

Editor: I. HAULICĂ

FIZIOLOGIE UMANĂ

Ediția a III-a, revizuită și adăugită



EDITURA MEDICALĂ, BUCUREȘTI
2007

"Toate drepturile editoriale aparțin în exclusivitate Editurii Medicale. Publicația este marcă înregistrată a Editurii Medicale, fiind protejată integral de legislația internă și internațională. Orice valorificare a conținutului în afara limitelor acestor legi și a permisiunii editorilor este interzisă și pasibilă de pedeapsă. Acest lucru este valabil pentru orice reproducere – integrală sau parțială, indiferent de mijloace (multiplicări, traduceri, microfilmări, transcrieri pe dischete etc.)."

Redactor de carte: IRINA BELOIU
Secretar de redacție: MARIA NEAMȚ
Corectură: CORINA GHINOIU

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României
HAULICĂ IOAN
FIZIOLOGIE UMANĂ / I. HAULICĂ – Ed. a 3-a, revizuită și
adăugită – București: Editura Medicală, 2007.
Bibliografie.
Index.

ISBN 978-973-39-0597-4

612

AUTORI

Apostol Ion – Prof. univ. U.M.F. Iași
Bild Walther – Șef de lucrări – Fiziologie – U.M.F. Iași
Boișleanu Daniela – Conf. univ. U.M.F. Iași
Brănișteanu Dumitru – Prof. univ. U.M.F. Iași
Chis Irina – Șef de lucrări – U.M.F. Cluj-Napoca
Carasevici Eugen – Prof. univ. U.M.F. Iași
Haulică Ion – Prof. univ. consult. U.M.F. Iași
Mureșan Adriana – Prof. univ. U.M.F. Cluj-Napoca
Neamțu Cornelii – Prof. univ. U.M.F. Iași
Neamțu Andrei – Șef de lucrări U.M.F. Iași
Petrescu Gheorghe – Prof. univ. U.M.F. Iași
Petrescu Zenobia – Prof. univ. U.M.F. Iași
Rusu Valeriu – Prof. univ. U.M.F. Iași
Sabău Marius – Prof. univ. U.M.F. Tg. Mureș
Slătineanu Simona – Prof. univ. U.M.F. Iași
Stratone Ana – Prof. univ. U.M.F. Iași
Stratone Carmen – Șef de lucrări U.M.F. Iași
Șerban Dragomir – Șef de lucrări U.M.F. Iași
Șerban Lăcrămioara – Șef de lucrări U.M.F. Iași
Topoliceanu Florin – Prof. univ. U.M.F. Iași
Zăgrean Leon – Prof. univ. U.M.F. București

Coli de tipar: 131, 5
Apărut: 2007

Tiparul executat sub c-da 91,
la Imprimeria de Vest, Oradea,
Str. Calea Aradului nr. 35.
România



CUPRINS

Cuprins	5
Content	17
Cuvânt înainte la ediția I	29
Cuvânt înainte la ediția a II-a	30
Cuvânt înainte la ediția a III-a	31
Date introductive	33

FIZIOLOGIE GENERALĂ ȘI CELULARĂ

1. Compoziția chimică a materiei vii – Simona Slătineanu, D. D. Brănișteanu, I. Haulică, Lăcrămioara Șerban	39
1.1. Elemente chimice ale materiei vii	40
1.2. Combinațiile organice și anorganice din materia vie	52
1.2.1. Substanțele organice	52
1.2.2. Substanțele anorganice	59
2. Organizarea structural-funcțională a celulei – G. Petrescu, I. Haulică, D. D. Brănișteanu	61
2.1. Nucleul	62
2.2. Matricea citoplasmatică	63
2.2.1. Ribozomii	63
2.2.2. Reticulul endoplasmatic	64
2.2.3. Aparatul Golgi	65
2.2.4. Lizozomii	66
2.2.5. Mitocondriile	67
2.2.6. Peroxisomii	68
2.2.7. Aparatul locomotor ciliar	69
2.2.8. Organitele celulare specifice	70
2.2.9. Incluziunile celulare	70
2.3. Membrana celulară (plasmalema)	70
2.3.1. Tipuri de biomembrane și rolurile lor	70
2.3.2. Compoziția chimică și structura moleculară a membranelor celulare	71
2.3.3. Transportul prin membrane biologice	75
2.3.3.1. Tipuri de transport prin membrane	75
2.3.3.2. Transportul macromoleculelor	88
2.3.3.3. Transportul prin membrane și permeabilitatea membranelor	88
2.3.3.4. Modalități morfologice și funcționale de comunicare intercelulară	90
2.3.3.5. Transportul micromolecular pasiv. Canale ionice	91
2.3.3.6. Sisteme de transport activ	98
2.3.4. Dinamica membranelor celulare	101
2.3.5. Comunicări intercelulare – rolul membranelor în transmiterea informațiilor	102
2.3.5.1. Mesagerii primari (mesageri I)	103
2.3.5.2. Receptorii celulari	104
2.3.5.3. Sistemul mesagerilor secunzi și acțiunea lor asupra protein kinazelor și a protein fosfatazelor	110
3. Proprietățile fundamentale ale materiei vii – I. Haulică, G. Petrescu, F. Topoliceanu, D. N. Șerban	115
3.1. Excitabilitatea	115
3.1.1. Bazele electro-chimice ale excitabilității neuronale	116

3.1.1.1. Originea potențialului de repaus	116
3.1.1.2. Parametrii excitabilității	119
3.1.1.3. Răspunsul local	121
3.1.1.4. Potențialul de acțiune. Teoria ionică	121
3.1.1.5. Modificările excitabilității în cursul potențialului de acțiune	122
3.1.1.6. Acomodarea și panta limită	123
3.1.1.7. Descărcarea repentină. Automatismul	123
3.1.1.8. Factorii ce scad excitabilitatea	124
3.2. Conductibilitatea	124
3.2.1. Conducerea în fibrele nervoase amielinice	124
3.2.2. Conducerea în fibrele nervoase mielinizate	125
3.2.3. Viteza de conducere a influxului nervos	126
3.2.4. Potențialul de acțiune compus. Electroneurograma	126
3.2.5. Fenomene metabolice ce însoțesc conducerea în fibra nervoasă	127
3.2.6. Oboseala nervoasă. Inhibiția Vedenski	127
3.3. Transmiterea sinaptică	127
3.3.1. Particularitățile morfo-funcționale ale sinapselor	127
3.3.2. Biosinteza și eliberarea substanțelor mediatore	131
3.3.3. Manifestări electro-chimice postsinaptice	133
3.3.4. Mediația chimică sinaptică	134
3.4. Modificările răspunsului neuronal postsinaptic	148
3.5. Elemente de morfo-fiziologie neuro-musculară	149
3.5.1. Arhitectura histo-fiziologică a musculaturii striate	149
3.5.2. Tipuri de fibre musculare	150
3.5.3. Proprietățile fibrei musculare	150
3.5.4. Permeabilitatea și polaritatea electrică	150
3.5.5. Excitabilitatea	151
3.5.5.1. Rolul ionilor în generarea excitabilității musculare	151
3.5.5.2. Geneza și conducerea excitației în fibra musculară striată	152
3.5.6. Contracilitatea	154
3.5.6.1. Bazele celulare ale contracției musculare	154
3.5.6.2. Sistemul energogen al contracției musculare	156
3.5.6.3. Manifestări termice	157
3.5.6.4. Manifestări electrice musculare	158
3.5.7. Elasticitatea	158
3.5.8. Tonicitatea	159
3.5.8.1. Mecanisme tonice	159
3.5.8.2. Implicații funcționale	159
3.6. Mușchiul neted	160
3.6.1. Generalități. Clasificare	160
3.6.2. Modalități de excitație a mușchilor netezi	160
3.6.2.1. Mecanisme membranare depolarizante	161
3.6.2.2. Mecanisme hormonale	161
3.6.3. Mecanismul contractil în miocitul neted	162
3.6.3.1. Introducere	162
3.6.3.2. Fluxurile de calciu în miocitul neted	162
3.6.3.3. Cuplarea excitație-contracție și mecanismul molecular al contracției	164
3.6.3.4. Mecanismele relaxării miocitelor netede	164
3.6.3.5. Sensibilitatea interacțiunii actină-miozină față de calciul citosolic	164
4. Sisteme de reglare și control la nivel celular – I. Haolică	167
4.1. Tipuri de reglare și control	168
4.1.1. Controlul genetic și biochimic celular	169
4.1.2. Caracteristicile sistemelor de control biologice	171
5. Mediul intern – Simona Stăneanu, I. Haubică, E. Carasevici, Adriana Mureșan, Irina Cluiș	175
5.1. Apa în organism	175
5.1.1. Repartiția apei în organism	175
5.1.2. Deplasarea apei în organism	178
5.1.3. Echilibrul hidric al organismului	178
5.1.4. Perturbări ale echilibrului hidric	179

5.1.5. Măsurarea distribuției apei în organism	180
5.2. Sângele	182
5.2.1. Compoziția și funcțiile sângelui	184
5.2.2. Proprietățile fizico-chimice ale sângelui	185
5.2.3. Compoziția plasmăi sanguine	186
5.2.4. Presiunea osmotică și coloidosmotică	189
5.2.5. Echilibrul acido-bazic, reacția sângelui	189
5.2.5.1. Variațiile fiziologice ale pH-ului sanguin	190
5.2.5.2. Mecanismele menținerii echilibrului acido-bazic	191
5.2.5.3. Variațiile patologice ale pH-ului sanguin	193
5.2.6. Hematiile	193
5.2.6.1. Date de morfologie funcțională	193
5.2.6.2. Date funcționale privind hematopoieza	196
5.2.6.3. Reglarea eritropoezei	198
5.2.6.4. Sinteza hemoglobinei	200
5.2.6.5. Circuitul fierului în organism	202
5.2.6.6. Factori cu rol catalitic în sinteza hemoglobinei	204
5.2.6.7. Funcțiile membranei eritrocitare și ale eritrocitului	205
5.2.6.8. Degradarea eritrocitelor. Hemoliza fiziologică	206
5.2.6.9. Grupele sanguine. Transfuzia	207
5.2.7. Leucocitele	208
5.2.7.1. Granulocitele	209
5.2.7.2. Funcțiile granulocitelor neutrofile și eozinofile	211
5.2.7.3. Funcțiile granulocitelor bazofile (mastocite)	214
5.2.7.4. Complexul monocite-macrofage	214
5.2.8. Limfocitele	216
5.2.9. Imunitatea	217
5.2.9.1. Imunitatea specifică și nespecifică	217
5.2.9.2. Componentele sistemului imun nespecific	219
5.2.9.3. Antigene și imunogenitate	220
5.2.9.4. Anticorpii	222
5.2.9.5. Celulele implicate în răspunsul imun specific	223
5.2.9.6. Tipuri de imunitate imorală după modul de instalare	227
5.2.10. Trombocitele	227
5.2.10.1. Hemostaza fiziologică	229
5.2.10.2. Coagularea sângelui	230
5.2.10.3. Tulburările hemostazei normale	237
5.2.10.4. Explorarea hemostazei și fibrinolizei	238

FIZIOLOGIE SPECIALĂ

6. Fiziologia inimii – M. Sabău, I. Haubică, D. D. Brănișteanu, G. Petrescu, W. Bild	243
6.1. Particularitățile morfo-funcționale ale inimii	243
6.1.1. Particularități ale metabolismului miocardului	249
6.1.1.1. Particularități ale metabolismului ATP și ale ionului de calciu la nivelul cardiomiocitului	251
6.1.1.2. Modalitățile de răspuns ale miocardului în diferite circumstanțe fiziologice și patologice	252
6.1.2. Cordul – organ endocrin	255
6.2. Proprietățile mușchiului cardiac	257
6.2.1. Excitabilitatea (funcția batmotropă)	257
6.2.2. Automatismul	260
6.2.3. Ritmicitatea (funcția cronotropă)	262
6.2.4. Conductibilitatea (funcția dromotropă)	263
6.2.5. Contractilitatea (funcția inotropă)	264
6.2.5.1. Caracteristicile contracției mușchiului cardiac	268
6.2.6. Tonicitatea (funcția tonotropă)	273
6.3. Manifestările activității cardiace	273
6.3.1. Fenomenele mecanice – revoluția cardiacă	273

6.3.2. Fenomenele acustice în cursul revoluției cardiace	278
6.3.3. Fenomenele volumetrice în cursul revoluției cardiace	281
6.4. Consecințele funcționale ale activității cardiace	282
6.4.1. Presiunile intracavitare în cursul revoluției cardiace	283
6.4.2. Debitul cardiac	283
6.4.3. Lucrul mecanic al inimii	288
6.5. Fenomenele electrice ale activității cardiace. Electrocardiograma (ECG)	289
6.5.1. Principiul electrocardiografiei	290
6.5.2. Electrogenza și morfologia undelor ECG	297
6.5.2.1. Proiecția vectorilor complexului de activare ventriculară în diferite derivații	298
6.5.2.2. Axa electrică a inimii	300
6.5.2.3. Variații fiziologice ale ECG	301
6.5.2.4. Modificări patologice ale ECG	302
6.5.3. Vectocardiografia și electrocardiografia endocavitară	304
6.6. Reglarea neuro-umorală a activității cardiace	305
6.6.1. Mecanisme intrinseci	305
6.6.2. Mecanisme extrinseci neuro-reflexe	306
6.6.2.1. Interacțiuni simpatice-parasimpatice cu rol în modularea activității cardiace	308
6.6.3. Mecanisme extrinseci omorale	309
7. Fiziologia sistemelor vasculare – I. Haulică, D. N. Șerban, W. Bild	311
7.1. Particularități morfo-funcționale ale sistemului vascular	312
7.2. Proprietăți fiziologice ale sistemului vascular	314
7.3. Circulația arterială	315
7.3.1. Hemodinamica vasculară	315
7.3.2. Presiunea arterială	321
7.3.2.1. Factorii determinanți ai presiunii arteriale	322
7.3.2.2. Metode de determinare a presiunii arteriale	323
7.3.2.3. Tipuri de presiune arterială	326
7.3.2.4. Manifestări periferice ale presiunii arteriale	327
7.3.2.5. Variațiile presiunii arteriale	329
7.3.3. Reglarea presiunii arteriale	330
7.3.3.1. Reglarea nervoasă	331
7.3.3.2. Reglarea umorală	338
7.3.3.3. Integrarea reacțiilor nervoase și umorale	342
7.3.3.4. Consecințe ale creșterilor presiunilor de lungă durată	345
7.3.4. Distribuția tisulară a fluxului sanguin	346
7.3.4.1. Controlul microcirculației de către sistemul nervos vegetativ	347
7.3.4.2. Controlul local al microcirculației	348
7.3.4.3. Reglarea activității mușchiului neted prin intermediul endotelului	348
7.4. Circulația capilară	352
7.4.1. Particularități morfo-funcționale ale capilarelor	353
7.4.1.1. Curgerea sângelui în capilare	354
7.4.1.2. Structura peretelui capilar	355
7.4.1.3. Transportul de substanțe prin peretele capilar	357
7.4.2. Reglarea circulației capilare	363
7.4.2.1. Reglarea nervoasă	363
7.4.2.2. Reglarea umorală	363
7.5. Circulația venoasă	365
7.5.1. Particularități morfo-funcționale ale sistemului venos	365
7.5.2. Funcțiile venelor	367
7.5.3. Factorii întoarcerii venoase	368
7.5.4. Presiunea venoasă	370
7.5.5. Reglarea circulației venoase	373
7.5.6. Timpul de circulație	374
7.6. Circulația limfatică	374
7.6.1. Capilarele și vasele limfatice	374
7.6.2. Formarea limfei	376
7.6.3. Factorii determinanți ai circulației limfatice	376
7.6.4. Rolul circulației limfatice	377

7.7. Particularități circulatorii regionale	378
7.7.1. Circulația coronariană	378
7.7.2. Circulația cerebrală	382
7.7.3. Circulația muscularilor scheletice	383
8. Fiziologia aparatului respirator – Simona Slătineanu, I. Haulică, Daniela Boișteanu	385
8.1. Respirația pulmonară	385
8.2. Particularități morfo-funcționale ale aparatului respirator	386
8.2.1. Sistemul de conducte aeriene	387
8.2.2. Structura funcțională a plămânului	388
8.2.3. Vascularizația plămânului	389
8.2.3.1. Vascularizația nutritivă	389
8.2.3.2. Vascularizația funcțională	390
8.2.3.3. Circulația limfatică pulmonară	393
8.2.4. Inervația plămânului	393
8.3. Mecanica ventilației pulmonare	394
8.3.1. Mișcările cutiei toracice	394
8.3.2. Mișcările plămânilor	396
8.3.3. Pleura	397
8.3.4. Ecuația mișcării sistemului toraco-pulmonar	400
8.3.4.1. Rezistența pulmonară	401
8.3.5. Trăvialul ventilator	402
8.3.6. Curba volum-presiune pulmonară	402
8.3.6.1. Histereza pulmonară	403
8.3.6.2. Surfactantul pulmonar	404
8.4. Ventilația pulmonară	406
8.4.1. Metode de studiu al ventilației pulmonare	407
8.4.2. Volume și capacități respiratorii	409
8.5. Schimburi gazoase la nivel alveolo-capilar	410
8.5.1. Factori care influențează transferul alveolo-capilar	412
8.5.2. Transferul gazelor respiratorii prin membrana alveolo-capilară	414
8.5.2.1. Transferul oxigenului	414
8.5.2.2. Transferul bioxidului de carbon	415
8.5.2.3. Difuziunea gazelor inerte	416
8.5.2.4. Transferul apei și al diferitelor soluții prin membrana alveolo-capilară	417
8.6. Transportul sanguin al gazelor respiratorii	419
8.6.1. Transportul sanguin al oxigenului	420
8.6.1.1. Forma solubilă a O_2	420
8.6.1.2. Radicalii liberi ai O_2 și stresul oxidativ	421
8.6.1.3. Forma combinată a O_2	423
8.6.1.4. Rezervele de O_2 ale organismului	429
8.6.2. Transportul sanguin al bioxidului de carbon	430
8.6.2.1. Forma dizolvată a CO_2	430
8.6.2.2. Forma combinată a CO_2	430
8.6.2.3. Curba de disociere a CO_2 sanguin	432
8.7. Respirația tisulară	432
8.7.1. Etapele respirației celulare	434
8.7.2. Dozarea gazelor respiratorii	436
8.8. Reglarea respirației	437
8.8.1. Reglarea nervoasă	438
8.8.2. Reglarea umorală	439
8.8.2.1. Controlul chemoreceptor central	440
8.8.2.2. Controlul chemoreceptor periferic	440
8.8.3. Alte reflexe care afectează respirația	441
8.8.4. Controlul voluntar al respirației	442
8.8.5. Rolul căilor respiratorii superioare	443
8.9. Reglarea bronhomotricității	444
8.9.1. Reglarea nervoasă	444
8.9.2. Reglarea umorală	445
8.10. Funcțiile nerespiratorii ale plămânului	446

8.10.1. Funcția antioxică	446
8.10.2. Funcția metabolică	448
8.10.3. Funcțiile accesorii ale plămânului	449
8.11. Fenomenele auscultatorii pulmonare	449
8.12. Fonația	450
9. Fiziologia aparatului digestiv – I. Haulică, C. Neamtu, Lăcrămioara Șerban	453
9.1. Alimentația	453
9.1.1. Necesarul caloric al organismului	454
9.1.2. Necesarul de vitamine al organismului	458
9.1.3. Rația alimentară	462
9.2. Fiziologia digestiei	466
9.2.1. Digestia bucală	469
9.2.1.1. Secreția salivară	469
9.2.1.2. Fenomenele mecanice ale digestiei bucale	474
9.2.1.3. Masticarea	474
9.2.1.4. Deglutiția	477
9.2.1.5. Secreția și motilitatea esofagiană	478
9.2.1.6. Reglarea deglutiției	481
9.2.2. Digestia gastrică	484
9.2.2.1. Secreția gastrică	484
9.2.2.2. Reglarea secreției gastrice	487
9.2.2.3. Explorarea secreției gastrice	495
9.2.2.4. Motilitatea gastrică	496
9.2.2.5. Reglarea motilității gastrice	500
9.2.2.6. Explorarea motilității gastrice	503
9.2.3. Digestia intestinală	503
9.2.3.1. Secreția pancreatică	503
9.2.3.2. Reglarea secreției pancreatice	506
9.2.3.3. Explorarea secreției pancreatice	508
9.2.3.4. Secreția și motilitatea biliară	508
9.2.3.5. Reglarea secreției și motilității biliare	512
9.2.3.6. Explorarea secreției și motilității biliare	514
9.2.3.7. Secreția intestinului subțire	515
9.2.3.8. Reglarea secreției intestinului subțire	517
9.2.3.9. Motilitatea intestinului subțire	519
9.2.3.10. Reglarea motilității intestinale	521
9.2.3.11. Secreția și motilitatea intestinului gros	522
9.2.3.12. Activitatea bacteriană intestinală	524
9.2.3.13. Defecația	525
9.2.4. Aerul digestiv	527
9.2.5. Elemente de neurofiziologie gastro-intestinală	527
9.2.6. Fenomenele chimice ale absorbției	530
9.2.6.1. Digestia și absorbția glucidelor	530
9.2.6.2. Digestia și absorbția proteinelor	532
9.2.6.3. Digestia și absorbția lipidelor	534
9.2.6.4. Absorbția vitaminelor	537
9.2.6.5. Absorbția apei și electroliților	538
9.2.6.6. Absorbția mineralelor	539
9.2.6.7. Absorbția sărurilor biliare	539
9.2.6.8. Absorbția și excreția prin colon	540
9.2.6.9. Alte căi de absorbție ale organismului	540
10. Metabolismul intermediar și energetic – I. Haulică, A. Neamtu	543
10.1. Funcțiile metabolice ale ficatului	543
10.2. Reacții energogene celulare	544
10.3. Metabolismul hidrocarbonatelor	546
10.3.1. Căile de catabolizare a glucoziei	548
10.3.2. Căile de fosfogluconat	551
10.3.3. Gluconeogeneza	551
10.4. Metabolismul lipidic	551

10.4.1. Repartiția și transportul lipidelor	552
10.4.2. Metabolizarea trigliceridelor și formarea ATP	555
10.5. Metabolismul proteinelor	557
10.6. Metabolismul bazal	560
11. Fiziologia aparatului excretor – G. Petrescu, I. Haulică, Zenaida Petrescu	563
11.1. Date de morfologie funcțională a rinichiului	563
11.1.1. Vascularizația rinichiului	566
11.1.2. Inervația rinichiului	568
11.2. Mecanismul de formare a urinei	568
11.2.1. Filtrarea glomerulară	569
11.2.2. Funcțiile tubulare	573
11.2.2.1. Mecanismul transporturilor tubulare renale	576
11.2.2.2. Mecanismele de diluție și concentrare a urinei	585
11.3. Participarea rinichiului la menținerea echilibrului acido-bazic	588
11.3.1. Secreția tubulară a ionului de hidrogen	589
11.3.2. Reabsorbția de bicarbonat la nivelul rinichiului	589
11.3.3. Sistemul tampon fosfat disodic-fosfat monosodic	590
11.3.4. Secreția de amoniac	591
11.3.5. Limitele intervenției rinichiului în menținerea echilibrului acido-bazic	592
11.4. Funcția endocrină a rinichiului	592
11.4.1. Renina	593
11.4.2. Eritropoietina	595
11.4.3. Factorul vasodilatator renal (medulina)	596
11.4.4. Eliberarea de enzime kininogenomice	597
11.5. Aspecte privind menținerea echilibrului glomerulo-tubular	598
11.5.1. Mecanisme fizice care intervin în reglarea funcției glomerulo-tubulare	599
11.5.2. Interacțiuni nervoase și umorale cu mecanismul presiune-natriureză-diureză	601
11.6. Lucrul rinichiului	602
11.7. Reglarea funcției renale	602
11.7.1. Mecanismele nervoase de reglare a funcției renale	602
11.7.2. Mecanismele hormonale de reglare a funcției renale	602
11.8. Explorarea funcțiilor rinichiului	606
11.8.1. Metode indirecte de explorare a funcțiilor rinichiului	607
11.8.2. Metode directe de explorare a funcțiilor rinichiului	610
11.9. Fiziologia căilor urinare	613
11.10. Fiziologia vezicii urinare. Micțiunea	614
11.10.1. Mecanismul neuro-reflex al micțiunii	615
12. Fiziologia pielii – Zenaida Petrescu, I. Haulică	617
12.1. Funcția de protecție	618
12.1.1. Procesul de keratinizare	618
12.1.2. Melanogeneza	619
12.1.3. Producerea fanerelor (părul și unghiile)	621
12.1.3.1. Părul	621
12.1.3.2. Unghiile	622
12.2. Funcțiile de secreție și excreție ale pielii	622
12.2.1. Secreția sebacee	622
12.2.2. Secreția sudorală	623
12.3. Funcția senzorială a pielii	625
12.4. Funcția de apărare a pielii	625
12.5. Rolul pielii în menținerea homeostaziei organismului	626
12.5.1. Rolul pielii în homeostazia hidrică	626
12.5.2. Rolul pielii în reglarea hemodinamică	626
12.5.3. Rolul pielii în homeostazia hormonală	626
12.6. Funcția imunologică a pielii	627
12.7. Funcția de penetrabilitate a pielii	628
13. Fiziologia glandelor endocrine – I. Haulică, W. Bild	631
13.1. Hipofiza	634
13.1.1. Date morfo-funcționale generale	634
13.1.2. Funcțiile hipofizei	636

13.1.3. Hormonii adenohipofizari și controlul hipotalamic al acestora	636
13.1.3.1. Hormonii hipofizotropi hipotalamici	637
13.1.3.2. Hormonul de creștere	638
13.1.3.3. Hormonul adrenocorticotrop	641
13.1.3.4. Hormonul tireotrop	644
13.1.3.5. Hormonii gonadotropi	646
13.1.3.6. Prolactina	648
13.1.3.7. Hormonul melanotrop	649
13.1.4. Hormonii retrohipofizari	650
13.1.4.1. Hormonul antidiuretic	650
13.1.4.2. Oxitocina	652
13.2. Suprarenalele	653
13.2.1. Hormonii corticosuprarenali	654
13.2.1.1. Biosinteza și metabolizarea hormonilor corticosuprarenali	654
13.2.1.2. Hormonii glicocorticoizi	655
13.2.1.3. Hormonii mineralocorticoizi	658
13.2.1.4. Hormonii sexizi	659
13.2.2. Hormonii medulosuprarenali	660
13.2.2.1. Biosinteza, acțiunile și metabolizarea hormonilor medulosuprarenali	660
13.3. Gonadele	664
13.3.1. Gonadele feminine	664
13.3.1.1. Ciclul ovarian endometrial și menstruația	667
13.3.1.2. Reglarea secreției ovariene	669
13.3.1.3. Pubertatea	670
13.3.1.4. Menopauza	670
13.3.2. Gonadele masculine	670
13.3.2.1. Funcția exocrină a testiculelor	670
13.3.2.2. Funcția endocrină a testiculelor	672
13.4. Tiroida	674
13.4.1. Biosinteza hormonilor tiroidieni	674
13.4.2. Acțiunile biologice ale hormonilor tiroidieni	676
13.4.3. Reglarea secreției hormonilor tiroidieni	679
13.5. Pancreasul endocrin	681
13.5.1. Insulina	681
13.5.2. Glucagonul	685
13.5.3. Somatostatina	686
13.5.4. Polipeptidul pancreatic	686
13.5.5. Reglarea glucozei sanguine	687
13.6. Paratiroidale	688
13.6.1. Distribuția ionilor de calciu și fosfor	688
13.6.2. Hormonul paratiroidian (PTH)	690
13.6.3. Calcitonina	693
13.7. Epifiza	694
13.7.1. Particularități morfo-funcționale	694
13.7.2. Hormonii epifizari	695
13.8. Timusul	698
13.9. Prostata	699
14. Hormonii locali – I. Haulică, C. Neamțu, W. Bild	701
14.1. Monoaminele biogene	702
14.2. Hormonii locali peptidici	704
14.2.1. Sistemul renin-angiotensină	705
14.2.1.1. Noi angiotensine bioactive	708
14.2.2. Sistemul kininogenaze-kinine	710
14.2.3. Hormonii gastro-intestinali	713
14.2.4. Opioidul endogen	719
14.2.5. Substanța P	722
14.2.6. Neurotensina	722
14.2.7. Factorul natriuretic atrial	723
14.2.8. Leptina	724

14.3. Hormonii locali lipidici	724
15. Fiziologia reproducerii, nașterii și dezvoltării neonatale – Carmen Stratone, I. Haulică, Ana Stratone	729
15.1. Comportamentul sexual	729
15.2. Fecundajia	733
15.3. Particularități funcționale ale perioadei de gestație	734
15.3.1. Rolurile placentei	734
15.3.2. Lichidul amniotic	737
15.3.3. Răspunsul organismului matern în perioada gestației	738
15.4. Particularități funcționale ale perioadei fetale și neonatale	739
15.5. Nașterea	748
15.5.1. Factori de declanșare și întreținere a travaliului	748
15.5.2. Modificări ale fluxului sanguin mero-placentar și ale placentei în travaliu	752
15.5.3. Modificări ale diversilor parametri funcționali la făt în timpul nașterii	753
15.5.4. Adaptări endocrine în sarcină și travaliu	754
15.5.5. Adaptări metabolice în sarcină și travaliu	754
15.5.6. Adaptări placentare în sarcină și travaliu	755
15.5.7. Durerea din timpul travaliului	755
15.6. Lactajia	756
16. Particularități funcționale ale copilăriei – Ana Stratone, I. Haulică	759
16.1. Perioada de nou-născut	759
16.2. Sngarul și copilul	761
17. Fiziologia senescenței – I. Haulică	767
17.1. Date generale	767
17.2. Aspecte celulare ale îmbătrânirii	768
17.2.1. Teorii privind îmbătrânirea biologică	768
17.3. Modificări conformaționale	770
17.4. Modificări funcționale la nivelul diverselor țesuturi și organe	771
18. Fiziologia aparatului locomotor – F. Topoliceanu, I. Haulică, I. Apostol	779
18.1. Mișcarea, postura și dezvoltarea funcției locomotorii	779
18.2. Elemente de morfo-fiziologie osoasă	780
18.2.1. Osul ca țesut	780
18.2.1.1. Bazele morfo-fiziologice ale formării, creșterii și dezvoltării sistemului osos	780
18.2.2. Osul ca organ funcțional	782
18.2.2.1. Caracteristici structural-funcționale	783
18.2.3. Funcțiile sistemului osos	784
18.2.4. Elemente de morfo-fiziologie articulară	784
18.2.4.1. Caracteristici morfo-funcționale generale	785
18.2.4.2. Articulația ca unitate funcțională	788
18.3. Mnsclatura scheletică la nivelul întregului organism	789
18.3.1. Organizarea macroscopică a musculaturii scheletice	789
18.3.2. Inervația musculară	790
18.3.2.1. Inervația senzitivă	790
18.3.2.2. Inervația motorie	790
18.3.3. Particularități ale contracției musculare în organism	792
18.3.3.1. Tipuri de contracții musculare	794
18.3.3.2. Forța musculară	795
18.3.3.3. Obosala musculară	796
18.3.4. Metabolismul muscular	797
18.3.4.1. Consumul de oxigen	797
18.3.4.2. Substratul energetic	798
18.3.4.3. Formarea și stocarea compoziților fosfat-macroergici	798
18.3.5. Troficitatea musculară	798
18.4. Postura și locomotia umană	799
18.4.1. Mecanisme generale ale posturii	799
18.4.1.1. Criterii anatomo-biomecanice și fiziologice ale stării de postură	800
18.4.2. Poziția ortostatică bipedă	802
18.4.3. Mecanismele generale ale locomotiei	803
18.4.3.1. Noțiuni generale de dinamică și cinematică locomotorie	804
18.4.3.2. Biocinetica locomotiei	806

19. Fiziologia sistemului nervos – I. Haolică, G. Petrescu, F. Topoliceanu, C. Neamțu, Aua Strazone	811
19.1. Organizarea funcțională a sistemului nervos	811
19.1.1. Sistemele senzitivo-senzoriale	812
19.1.2. Sistemele motorii sau efectoare	813
19.2. Elemente de histo-fiziologie neuronală	815
19.2.1. Neuronul	815
19.2.2. Nevroglia	817
19.2.3. Formarea, diferențierea și creșterea neuronilor	818
19.3. Sisteme aferente senzitivo-senzoriale	819
19.3.1. Clasificarea receptorilor	819
19.3.2. Proprietăți generale ale receptorilor	821
19.3.3. Mecanisme de inițiere a impulsului nervos la nivelul receptorilor senzitivo-senzoriali	823
19.3.4. Sistemul anex	823
19.3.5. Analiza și integrarea mesajelor senzitivo-senzoriale	824
19.4. Sensibilitatea exteroceptivă	825
19.4.1. Analiza și integrarea informațiilor exteroceptive	827
19.4.1.1. Transmiterea informațiilor pe calea sistemului cordonului posterior	827
19.4.1.2. Cortexul somato-senzorial	827
19.4.1.3. Transmiterea informațiilor pe calea sistemului lemnisc spinal (sistemul cordonului antero-lateral)	830
19.5. Sensibilitatea interoceptivă	831
19.6. Sensibilitatea proprioceptivă	832
19.6.1. Receptorii kinestezici	833
19.6.2. Căile de transmisie a propriocepției kinestezice	834
19.6.3. Mecanisme și implicații ale propriocepției kinestezice	835
19.7. Analizatorul vestibular	838
19.7.1. Particularități anatomo-funcționale	838
19.7.2. Căile de transmisie și integrare vestibulară	839
19.8. Analizatorul acustic	842
19.8.1. Sistemul de captare și transmisie	842
19.8.2. Sistemul de traducere	843
19.8.3. Sistemul de conducere	843
19.8.4. Segmentul central	846
19.8.5. Caracteristicile excitantului sonor	847
19.8.6. Rolul urechii medii	848
19.8.7. Rolul urechii interne	848
19.8.8. Rolul sistemului de conducere	849
19.8.9. Adaptarea și oboseala auzului	850
19.9. Analizatorul vizual	851
19.9.1. Particularități morfo-funcționale	851
19.9.1.1. Zona receptivă a analizatorului vizual	853
19.9.1.2. Segmentul intermediar al analizatorului vizual	854
19.9.1.3. Segmentul central al analizatorului vizual	856
19.9.2. Mecanismul fotorecepției	858
19.9.3. Acuitatea vizuală	861
19.9.4. Vederea culorilor	862
19.9.5. Simpul formelor	864
19.9.6. Simțul stereoscopie	864
19.9.7. Acomodarea oculară	865
19.10. Analizatorul gustativ	869
19.10.1. Particularități structurale	869
19.10.2. Stimularea mugurelui gustativ	870
19.10.3. Transmiterea impulsurilor gustative	871
19.10.4. Excitanții receptorilor gustativi	872
19.10.5. Senzația gustativă	873
19.10.6. Adaptarea gustativă	874
19.10.7. Explorarea gustativă	874
19.11. Analizatorul olfactiv	876
19.11.1. Particularități structurale	876

19.11.2. Stimularea receptorilor olfactivi	878
19.11.3. Senzația olfactivă	878
19.11.4. Adaptarea olfactivă	880
19.11.5. Explorarea funcției olfactive	880
19.12. Funcțiile motorii ale sistemului nervos	880
19.12.1. Zone și centri motori	882
19.12.1.1. Cortexul motor	882
19.12.1.2. Formațiuni motorii subcortice	884
19.12.1.3. Măduva spinării	886
19.12.1.4. Cerebelul	886
19.12.2. Căile motorii de conducere	889
19.12.3. Mecanisme motorii corticale	893
19.13. Fiziologia sistemului nervos vegetativ	897
19.13.1. Particularități morfo-funcționale	897
19.13.1.1. Componenta vegetativă intranevraxială	899
19.13.1.2. Componenta vegetativă extranevraxială	901
19.13.1.3. Dualitatea inervației vegetative eferente	902
19.13.2. Transmiterea umorală în sistemul nervos vegetativ	903
19.13.2.1. Fibre vegetative non-adrenergice și non-coltoergice	904
19.13.3. Funcțiile sistemului nervos vegetativ	904
19.13.3.1. Rolul integrativ al sistemului nervos vegetativ	908
20. Modalități de funcționare a sistemului nervos – I. Haolică, G. Petrescu, L. Zăgărean, C. Neamțu, Daniela Boisteanu	911
20.1. Activitatea reflexă	911
20.1.1. Arcul reflex	912
20.1.2. Proprietățile fundamentale ale reflexelor	914
20.2. Reflexele somatice medulare	916
20.2.1. Reflexele medulare monosinaptice	916
20.2.2. Reflexele medulare polisinpaptice	918
20.3. Reflexele vegetative medulare	920
20.4. Reflexele bulbare	921
20.5. Reflexele protuberanțiale	922
20.6. Reflexele mezencefalice	923
20.7. Activitatea bioelectrică a scoarței cerebrale	926
20.7.1. Traseul EEG normal	927
20.7.2. Utilizarea electroencefalogrammei în clinica umană	929
20.7.3. Potențiale evocate la nivelul scoarței cerebrale	930
20.8. Somnul și veghea	931
20.8.1. Manifestări caracteristice somnului fiziologic	932
20.8.2. Studiile somnului normal	934
20.8.3. Structuri și mecanisme de producere a veghii și somnului	937
20.8.4. Mecanisme neurochimice implicate în somn și veghe	939
20.8.5. Activitatea hipnică – Visele	941
20.8.6. Starea de vigilență	942
20.8.7. Periodicitatea micromerale a stărilor de veghe și somn	943
20.9. Reglarea comportamentului alimentar	944
20.9.1. Mecanismul de scurtă durată al reglării aportului alimentar	944
20.9.1.1. Alte mecanisme reglatoare ale comportamentului alimentar	946
20.9.2. Mecanismul de lungă durată al reglării aportului alimentar	949
20.9.3. Reglarea ingestiei de lichide	950
20.10. Bazele neurofiziologice ale durerii	951
20.10.1. Tipuri de durere	952
20.10.2. Structurile neuroanatomice ale durerii	952
20.10.2.1. Stimulii algogeni, suprafețe receptoare	952
20.10.2.2. Medierea extranevraxială a durerii	954
20.10.2.3. Medierea intranevraxială a durerii	954
20.10.3. Modularea durerii	956
20.10.4. Neurochimia durerii	959
20.10.5. Aspecte particulare ale comportamentului la durere	961

20.10.5.1. Hiperalgeziile și alte sindroame algice	962
20.11. Funcțiile nervoase superioare	963
20.11.1. Conștiința	963
20.11.1.1. Baze anatomo-fiziologice	963
20.11.2. Memoria	964
20.11.2.1. Tipuri de memorie	965
20.11.2.2. Localizarea proceselor nervoase de memorare	967
20.11.2.3. Bazele fiziologice ale memoriei	967
20.11.3. Procesul de învățare	969
20.11.3.1. Modalități de învățare	970
20.11.4. Inteligența	973
20.11.5. Gândirea	973
20.11.6. Vorbirea	974
20.11.7. Afectivitatea	976
20.12. Lichidul cefalorahidian	978
21. Elemente de fiziologie ambientală – I. Haulică, V. Ruso	979
21.1. Homeostazie și adaptare	979
21.2. Bioritmicitatea	984
21.2.1. Caracteristicile generale ale unui bioritm	985
21.2.2. Cronofiziologia umană	986
21.2.3. Variații fiziologice și patologice ale bioritmilor	987
21.3. Temperatura corporală și mediul ambiant	988
21.3.1. Echilibrul termic	989
21.3.2. Reglarea temperaturii corporale	992
21.3.3. Factorii de apărare contra frigului și căldurii	994
21.4. Efectele fiziologice ale altitudinii	995
21.4.1. Efectele expunerii acute	996
21.4.2. Efectele expunerii cronice	998
21.5. Date actuale de fiziologie aerospațială	999
21.5.1. Date sintetice asupra atmosferei terestre	999
21.5.2. Probleme fiziologice ale zborului în atmosferă	1000
21.5.3. Aspecte fiziologice și fiziopatologice întâlnite în cosmonautică	1002
21.5.3.1. Atmosfera artificială din cabina spațială	1003
21.5.3.2. Mediul cosmic sau spațial	1004
21.5.3.3. Consecințele accelerației și decelerației	1005
21.5.3.4. Starea de imponderabilitate	1005
21.6. Fiziologia mediului hiperbaric	1008
21.6.1. Submersia în incinte rigide	1008
21.6.2. Scufundarea directă în mediul acvatic	1009
21.6.3. Efectele hiperbarismului și gazelor la presiune crescută asupra organismului	1010
21.6.4. Problemele esențiale ale imersiei	1012
21.6.5. Problema decompresiei	1013
21.6.6. Alternative și metode de intervenție submarină	1014
21.7. Elemente de fiziologie a efortului	1014
21.7.1. Particularități ale contractilității musculare în efort	1015
21.7.2. Tipuri de efort fizic	1015
21.7.3. Cheltuielile energetice în efort	1016
21.7.4. Surse energetice în efort	1017
21.7.5. Reacții fiziologice în efort	1020
21.7.6. Constante sanguine în efort	1023
21.7.7. Termoreglarea în timpul efortului	1024
21.7.8. Limitele adaptabilității fiziologice	1025
21.7.9. Oboselă – refacere	1025
Bibliografie selectivă	1027
Index alfabetic	1031

CONTENT

Romanian Summary	5
Content	17
Foreword for the first edition	29
Foreword for the second edition	30
Foreword for the third edition	31
Introductory data	33

GENERAL AND CELLULAR PHYSIOLOGY

1 Chemical composition of the living matter – Simona Slătineanu, D. D. Brănișteanu, I. Haulică, Lăcrămioara Șerban	39
1.1. Chemical elements of the living matter	40
1.2. Organic and inorganic combinations of the living matter	52
1.2.1. Organic substances	52
1.2.2. Inorganic substances	59
2 Structural and functional organization of the cell – G. Petrescu, I. Haulică, D. D. Brănișteanu	61
2.1. The nucleus	62
2.2. The cytoplasmic matrix	63
2.2.1. Ribosomes	63
2.2.2. Endoplasmic reticulum	64
2.2.3. Golgi apparatus	65
2.2.4. Lysosomes	66
2.2.5. Mitochondria	67
2.2.6. Peroxisomes	68
2.2.7. Ciliary locomotor apparatus	69
2.2.8. Specific cellular organelles	70
2.2.9. Cellular inclusions	70
2.3. Cell membrane (plasmalemma)	70
2.3.1. Types of biomembranes and their roles	70
2.3.2. Chemical composition and molecular structure of cellular membranes	71
2.3.3. Transport through cell membranes	75
2.3.3.1. Transport types through membranes	75
2.3.3.2. Macromolecular transport	88
2.3.3.3. Membrane transport and membrane permeability	88
2.3.3.4. Morphologic and functional pathways for intercellular communication	90
2.3.3.5. Passive micromolecular transport. Ion channels	91
2.3.3.6. Active transport	98
2.3.4. Dynamic of the cell membranes	101
2.3.5. Intercellular communication – role of the cell membrane in information transfer	102
2.3.5.1. Primary messengers	103
2.3.5.2. Cellular receptors	104
2.3.5.3. The second messenger system and its action on protein kinases and protein phosphatases	110
3 Fundamental properties of the living matter – I. Haulică, G. Petrescu, F. Topoliceanu, D. N. Șerban	115
3.1. Excitability	115
3.1.1. Electrochemical bases of the neuronal excitability	116
3.1.1.1. Origin of the resting potential	116

3.1.1.2. Parameters of the excitability	119
3.1.1.3. Local response	121
3.1.1.4. Action potential. Ionic theory	121
3.1.1.5. Excitability changes during the action potential	122
3.1.1.6. Accommodation and limit slope	123
3.1.1.7. Repetitive discharges. Automatism	123
3.1.1.8. Factors decreasing the excitability	124
3.2. Conductibility	124
3.2.1. Conduction within nonmyelinated nervous fibers	124
3.2.2. Conduction within myelinated nervous fibers	125
3.2.3. Nervous impulse conduction speed	126
3.2.4. Composed action potential. Electroneurogram	126
3.2.5. Metabolic phenomena accompanying conduction in nervous fibers	127
3.2.6. Nervous fatigue. Vedenski inhibition	127
3.3. Synaptic transmission	127
3.3.1. Morphological characters of chemical transmission synapses	127
3.3.2. Biosynthesis and release of mediator substances	131
3.3.3. Postsynaptic electrochemical manifestations	133
3.3.4. Synaptic chemical mediation	134
3.4. Postsynaptic neuronal response	148
3.5. Elements of neuromuscular morpho-physiology	149
3.5.1. Histophysiological architecture of the striated muscle	149
3.5.2. Types of muscle fibers	150
3.5.3. Properties of the muscle fibers	150
3.5.4. Permeability and electric polarity	150
3.5.5. Excitability	151
3.5.5.1. Role of ions in the generation of muscle excitability	151
3.5.5.2. Excitation genesis and conduction in the striated muscular fiber	152
3.5.6. Contractility	154
3.5.6.1. Cellular bases of muscular contraction	154
3.5.6.2. Energetical system of muscle contraction	156
3.5.6.3. Thermal manifestations	157
3.5.6.4. Muscular electrical manifestations	158
3.5.7. Elasticity	158
3.5.8. Tonicity	159
3.5.8.1. Tonogenic mechanisms	159
3.5.8.2. Functional implications	159
3.6. Smooth muscular fiber	160
3.6.1. Generalities. Classification	160
3.6.2. Excitation modalities of the smooth muscle	160
3.6.2.1. Depolarizing membrane mechanisms	161
3.6.2.2. Hormonal mechanisms	161
3.6.3. Contractile mechanism in the smooth muscle	162
3.6.3.1. Introduction	162
3.6.3.2. Calcium fluxes in the smooth muscle cell	162
3.6.3.3. Excitation-contraction coupling and the molecular mechanisms of contraction	164
3.6.3.4. Relaxation mechanisms of the smooth muscle cells	164
3.6.3.5. Sensibility of the actin-myosin interaction to cytosolic calcium	164
4. Control and regulation systems at the cellular level - I. Haulică	167
4.1. Control and regulation types	168
4.1.1. Biochemical and genetic cellular control	169
4.1.2. Characteristics of biological control systems	171
5. Internal environment - Simona Slătineanu, I. Haulică, E. Carasevici, Adriana Mureșan, Irina Chis	175
5.1. Water in the organism	175
5.1.1. Water distribution in the organism	175
5.1.2. Water passage within the organism	178
5.1.3. Water balance of the organism	178
5.1.4. Water balance disturbances	179
5.1.5. Measuring the water distribution within the organism	180

5.2. Blood	182
5.2.1. Composition and functions of the blood	182
5.2.2. Physical and chemical proprieties of the blood	184
5.2.3. Blood plasma composition	186
5.2.4. Osmotic and colloid-osmotic pressure	189
5.2.5. Acid-base balance, blood pH	189
5.2.5.1. Physiologic variations of the blood pH	190
5.2.5.2. Mechanism of acid-base balance maintaining	191
5.2.5.3. Pathological variations of the blood pH	193
5.2.6. Red blood cells	193
5.2.6.1. Functional morphology information	193
5.2.6.2. Functional data regarding hematopoiesis	196
5.2.6.3. Regulation of erythropoiesis	198
5.2.6.4. Hemoglobin synthesis	200
5.2.6.5. Iron circuit in the organism	202
5.2.6.6. Catalytic factors in hemoglobin synthesis	204
5.2.6.7. Erythrocyte and erythrocyte membrane functions	205
5.2.6.8. Erythrocyte degradation. Physiological hemolysis	206
5.2.6.9. Blood types. Transfusion	207
5.2.7. Leukocytes	208
5.2.7.1. Granulocytes	209
5.2.7.2. Neutrophilic and eosinophilic granulocyte functions	211
5.2.7.3. Basophilic granulocyte functions (mastocytes)	214
5.2.7.4. Monocyte-macrophage complex	214
5.2.8. Lymphocytes	216
5.2.9. Immunity	217
5.2.9.1. Specific and non-specific immunity	217
5.2.9.2. Non-specific immune system components	219
5.2.9.3. Antigens and immunogenicity	220
5.2.9.4. Antibodies	222
5.2.9.5. Cells involved in specific immune response	223
5.2.9.6. Humoral immunity types, according to the initiation mode	227
5.2.10. Platelets	227
5.2.10.1. Physiological hemostasis	229
5.2.10.2. Blood coagulation	230
5.2.10.3. Normal hemostasis disturbances	237
5.2.10.4. Hemostasis and fibrinolysis exploration	238

SYSTEMIC PHYSIOLOGY

6. Physiology of the heart - M. Sabău, I. Haulică, D. D. Brănișteanu, G. Petrescu, W. Bild	243
6.1. Morphological and functional particularities of the heart	243
6.1.1. Particularities of the myocardial metabolism	249
6.1.1.1. Particularities of the ATP and calcium ions metabolism within the cardiomyocytes	251
6.1.1.2. Response capabilities of myocardium in various physiological and pathological circumstances	252
6.1.2. Heart - endocrine organ	255
6.2. Cardiac muscle proprieties	257
6.2.1. Excitability (batmotropic function)	257
6.2.2. Automatism	260
6.2.3. Rhythmicity (chronotropic function)	262
6.2.4. Conductibility (dromotropic function)	263
6.2.5. Contractility (inotropic function)	264
6.2.5.1. Cardiac muscle contraction characteristics	268
6.2.6. Tonicity (tonotropic function)	273
6.3. Manifestations of the cardiac activity	273
6.3.1. Mechanic phenomena - cardiac revolution	273
6.3.2. Acoustic phenomena during cardiac revolution	278

DATE INTRODUCTIVE

privind definiția și evoluția fiziologiei

Motto:

Înșușirea unei științe nu este posibilă fără cunoașterea dezvoltării sale.

A. Comte

Fiziologia, ca știință a funcțiilor materiei vii, se ocupă cu studiul proceselor și constantelor normale ale structurilor biologice superior organizate, începând cu celula și agregatele celulare din diversele țesuturi și organe și sfârșind cu organismul uman, entitatea biologică cea mai evoluată.

Termenul de fiziologie este de origine greacă (physis = principiu dător de viață; logos = știință) și a fost introdus în medicină de către Fernel (1542) pentru a sublinia latura explicativă a practicii medicale. Impunându-se din nevoia cunoașterii funcțiilor normale ale organismelor vii, ca termen de referință a diverselor stări patologice, cunoștințele fiziologice au stat dintotdeauna la baza atât a medicinei curative, cât și a celei preventive. Denumită și anatomia în mișcare sau anticamera patologiei, fiziologia a abordat de la început nu numai modul cum se desfășoară procesele vitale, ci și factorii care le determină și mecanismele lor de înreșinare.

Pe de altă parte, multe din problemele patologiei medicale neputând fi studiate decât prin intermediul cercetărilor experimentale, fiziologia a întregit investigațiile clinice cu experimente pe animale de laborator. În felul acesta, medicina, ca știință a vieții și suferinței umane, a beneficiat tot mai substanțial de pe urma cunoștințelor oferite de științele fiziologice. Dară obiectul fiziologiei a fost clar conturat încă de la începuturile sale, evoluția acesteia a fost lentă și anevoioasă din cauza concepțiilor filozofice dominante și a lipsei de metode și tehnici adecvate. De aceea, începuturile fiziologiei se pierd în negura vremurilor, confundându-se cu ale practicii medicale. După o primă etapă naturalist-filozofică, inaugurată de Hipocrat din Cos (sec. V î.e.n.), a urmat etapa anatomică, dominată de școala galenică (Galenus, sec. II e.n.) din Roma, a cărei orientare structuralistă se sfârșește abia în epoca Renașterii, cu unele analogii și ipoteze mecaniciste. Asemnând anul cu o mașină, inima cu o pompă și rinichiul cu un filtru, această nouă etapă materialist-mecanicistă incită la cercetări pe animale vii, punându-se bazele medicinei experimentale și fiziologiei științifice. La rândul lor, progresele tehnice din secolele al XVII-lea și al XVIII-lea creează tendința firească la aplicare a datelor de fizică și chimie la procesele vitale.

W. Harvey face prima descriere corectă a circulației în lucrarea: Exercitatio de motu cordis et sanguinis (1628), Malpighi (1661) descrie, la scurt timp după inventarea microscopului de către Anton Loewenboeck, circulația capilară ca punct de legătură între artere și vene, iar Haller (1727) măsoară presiunea și volumul sanguin, stabilind rolul rezistenței periferice în producerea variațiilor tensionale. Secolul al XVIII-lea este dominat de altfel de aforismul lui Haller, după care anatomia face descrierea organelor și fiziologia explică funcțiile lor. Paracelsus propune extinderea fenomenelor chimice la procesele vitale, iar Lavoisier, descoperind că respirația asigură oxidațiile tisulare, arată că la baza

vieții nu stau fenomene supranaturale, ci procese metabolice. Organismul nu mai este conceput ca a piesă mecanică, ci ca un laborator chimic. Se pun astfel bazele orientării bioenergetice în fiziologie, care va cunoaște un mare avânt în secolul următor, odată cu introducerea unor tehnici fizico-chimice din ce în ce mai perfecționate în arsenalul metodologic al cercetărilor biomedicale. Conform acestei noi concepții, toate manifestările vitale se realizează pe seama consumului de substanțe nutritive din mediul înconjurător, cu participarea oxigenului ca factor indispensabil de combustie.

Paralel cu datele de chimie fiziologică, se impun cercetările de fiziologie a sistemului neuromuscular, efectuate de Galvani, Du Bois Reymond, Helmholtz, Müller, von Brücke etc. Între timp, Fluorens (1803) descoperă centrul respirator bulbar, iar Secenov (1858) descrie reflexele creierului. Un oportunist a fost adus de Cl. Bernard prin descoperirea nervilor vasomotori, a funcțiilor glicogenolitice ale ficatului și constanței mediului intern. Opera sa de concepție – „Introducere în studiul medicinei experimentale” (1865) – a influențat profund evoluția ulterioară a fiziologiei, deschizând calea cercetărilor care au dus la descoperirea glandelor endocrine de către Brown Séquard (1890) și la formularea conceptului actual de homeostazie (Cannon, 1932).

Din aceeași perioadă datează cercetările lui Langerhans (1887) asupra rolului endocrin al pancreasului, precum și denumirea de harmani dată de Bayliss și Starling (1902) unei substanțe secretate de mucoasa duodenală (secretina) cu rol reglator asupra secreției pancreatice.

În domeniul neurofiziologiei, Sherrington (1897) introduce noțiunea de sinapsă, pentru a defini relațiile de contiguitate dintre neuroni, la scurt timp după descoperirea acestora de către Ramon y Cajal (1890), ca entități morfo-funcționale distincte ale sistemului nervos, iar Pavlov (1904) introduce metoda reflexelor condiționate în studiul activității nervoase superioare.

Progrese mari s-au înregistrat și în domeniul fiziologiei sistemului nervos vegetativ, ca cea de a doua cale eferentă a sistemului nervos cerebro-spinal, prin cercetările lui Gaskell (1880), Langley (1898), Dale (1934) etc.

La descoperirea mediației chimice simpatico-parasimpatice de către Otto Loewi (1921) s-a adăugat participarea zonelor reflexogene și a centrilor organo-vegetativi la reglarea neuro-umorală a marilor funcții ale organismului (circulație, respirație, digestie, excreție etc). În plus, s-a precizat că principalele reacții de apărare și adaptare la condițiile variabile ale mediului extern sau intern se realizează cu participarea sistemului simpatico-adrenergic, pe de o parte, și a complexului hipotalamo-hipofizo-corticosuprarenal, pe de alta. Una din primele dovezi morfologice ale legăturilor neuro-vasculare dintre hipotalamus și hipofiză, ca structură complexă de comandă și control al reacțiilor adaptative neuro-endocrino-metabolice, a fost adusă de Gr. T. Papa și Unna Fielding (1930) prin descoperirea sistemului port hipotalamo-hipofizar. Aceasta a constituit baza de plecare a cercetărilor ulterioare privind neurasecreția hipotalamică și factorii de eliberare a hormonilor adenohipofizari, ducând la conceptul actual despre hipotalamus ca glandă endocrină diencefalică. Contribuții valoroase la progresul cunoștințelor de fiziologie a glandelor endocrine au adus și profesorii Paulescu, Parhan și elevii lor, prin cercetările asupra harmanilor pancreatici și epifizari. Prof. N. Paulescu (1921) a descoperit, după cum se știe, hormonul pancreatic hipoglicemic insulina (pancreina), înaintea lui Banting, MacLeod și Best (1922), fiind frustrat de binemeritul premiului Nobel atribuit acestora. La rândul lor, profesorul Parhan și colaboratorii au contribuit substanțial la cunoștințele actuale privind rolul endocrin și metabolic al epifizei de „reglosor al reglozilor”, respectiv al complexului hipotalamo-hipofizar, de către armonii indolici și peptidici epifizari.

Fiind vorba de contribuții românești la evoluția fiziologiei, trebuie arătat că profesorul D. Danielopolu (1928) și doctorul Ștefan Odobleja (1938), interpretând reglările fiziologice prin prisma aferenței inverse, cu mult înainte ca Norbert Wiener (1940) să fi pus bazele ciberneticii, sunt considerați precursori ai biociberneticii.

Numeroase alte achiziții cognitive și aplicative s-au obținut în ultimele decenii grație progreselor tehnice și orientării cauzal-analitice a fiziologiei:

- s-a recănsiderat conceptul clasic: „un neuron un mediator chimic”, aducându-se dovezi experimentale în favoarea neurotransmișterilor umorale duble sau triple;

- s-a precizat rolul de mediator chimic sau contranșmițător al unor aminoacizi (acid glutamic, glicină, GABA) și peptide biologice (VIP, NPY, substanța P, neurotensina, peptide opioide etc);

- s-a înțeles că rolul hormonilor clasici cu cel al hormonilor locali, denumiți și factori autacoidi, secretați de sistemul endocrin difuz, paracrin sau APUD;

- s-au descoperit prostaglandinele, prostacilinele, tromboxanii și leucotrienele, ca produși biologici activi de natură lipidică;

- s-au făcut noi precizări privind participarea receptorilor, canalelor ionice și a pompelor active membranare la generarea manifestărilor electrice, mecanice, secretorii și nervoase celulare etc.

Multe din aceste descoperiri au devenit posibile datorită utilizării pe scară tot mai largă a tehnicilor biochimice, histochimice, imunohistofluorescente, radioimunologice și microelectrofiziologice moderne. Deși s-au smuls noi și numeroase așchii din stânca de granit a necunoscutelor materiei vii, nu se știe încă la modul exact ce este viața. Nici starea de sănătate, care constituie principalul obiect de studiu al fiziologiei, n-a putut fi definită în mod satisfăcător din punct de vedere fiziologic. Fiind vorba de concepte de referință ale fiziologiei și medicinei în general, în încheierea acestei scurte introduceri istorice vor fi făcute succinte referiri asupra evoluției și stadiului actual al cunoștințelor privind conținutul noțiunilor de viață și sănătate.

Referitor la viață, dacă ne limităm la definițiile simplificatoare din manualele sau dicționarele curente, se poate găsi cu relativă ușurință o formulare. În realitate, o tratare riguroasă științifică a vieții este extrem de dificilă. Obstacolul principal îl constituie faptul că, deși științele biologice se află într-o etapă de dezvoltare suficient de avansată, întrucât dispun de metode analitice care întesc cele mai subtile niveluri de organizare a materiei vii, explicarea unora dintre însușirile ce caracterizează esența vieții nu este încă satisfăcătoare.

În evoluția conceptului de viață s-au întâlnit odeseori filozofii cu cercetătorii din domeniul biologiei, primii conferind definițiilor apartenența la un concept sau o doctrină filozofică, iar ultimii concentrând formulările asupra esenței vieții la probele ce rezultau din cunoașterea științifică a celui mai complex fenomen din natură. Astfel, în timp ce mulți din marii biologi ai secolului al XIX-lea neagă posibilitatea de a defini viața, ca în cazul lui Pasteur de exemplu, gânditorii materialişti a considerat drept formă de mișcare a materiei vii. Semnificativ din acest punct de vedere este definiția următoare: „Viața este modul de existență a carpurilor albuminoide prevăzute cu capacitatea de autoreînnoire continuă a elementelor chimice ale acestora”. Punând accentul pe mișcare și reînnoire, această definiție conține prima trăsătură de esență a fenomenelor vieții, metabolismul. Ulterior, adăptă cu dezvoltarea și perfecționarea tehnicilor de biologie și fiziologie celulară, accesul către caracteristicile esențiale ale vieții a fost facilitat. Ca urmare, în afara metabolismului au fost considerate ca trăsături definitorii ale vieții autoreproducerea, creșterea și adaptarea. Aceste proprietăți depind de programul genetic propriu fiecărui organism și de influența factorilor de mediu.

La rândul lor, bioenergienții, învâcând cel de al doilea principiu al termodinamicii, consideră că materia vie este anti-entropică, întrucât se opune tendinței de destrucție și disipare a energiei exercitate de mediu. În acest sens, este de menționat definiția vieții dată de Schrödinger (1969) în cartea sa – „What is life?” (Ce este viața?): „Viața este o insulă de ordine în oceanul inens al dezordinii entropice”. Datorită anti-entropiei, materia vie este capabilă să-și păstreze structura și să evalueze către un plus de complexitate pe seama preluării energiei potențiale din materia brută și utilizării ei în scap energetic, plastic sau funcțional. Agregatele moleculare rezultate se organizează în celule, complexe celulare și organisme, realizând cu mediu înconjurător schimburi de substanțe, energie și informații. Laboratorul vital se compară astfel ca un sistem deschis, autoreglat și adaptat la necesitățile variabile ale materiei vii.

Prin prismo acestor puncte de vedere, viața poate fi considerată ca a formă superioară de mișcare a materiei, rezultată prin evoluție sub influența selecției naturale și caracterizată prin metabolism, autoreproducere, autoreglare și adoptare la condițiile variabile ale mediului extern și/sau intern. La baza so stau procese fizico-chimice și biologice de a complexitate deosebită, insuficient cunoscute deocamdată.

Atât timp cât reproducerea celulei vii n-a putut fi realizată în condiții experimentale de laborator, originea vieții rămâne obiectul diverselor teorii (creaționiste, panspermiei, generației spontanee, evoluționiste etc.) asupra biogenezei. De un credit crescând se bucură teoriile evoluției chimice (Oparin, 1924; Haldane, 1926), conform cărora viața a apărut și evoluat în apa oceanelor în urma acțiunii energiilor înalte solare asupra pământului abiatic și atmosferei primare. Ca rezultat al unui îndelungot proces de evoluție, majoritatea organismelor consideră că viața are la bază reacții biochimice înalte diferențiate, generatoare de creștere, autoreproducere și realizare a diverselor forme de activitate specifică materiei vii, adoptate și întreținute în limite constante grație echilibrului homeostazic.

Cea de a doua noțiune intim legată de viață privește sănătatea definită de OMS ca starea de bine și confort fizic, psihic și social, în absența oricărei boli sau infirmități clinice. În esență, este vorba de relația armonioasă între structuri și funcții ca rezultat al echilibrului homeostazic și capacității de adaptare la mediu.

Factorii de menținere a sănătății ca expresie a normalității sunt endogeni și exogeni. Din prima categorie fac parte factorii genetici, care conferă particularitățile genotipice și fenotipice ale individului, influențate de agenții chimici (teratogeni), fizici, alimentari etc. Ei asigură calitatea stărilor fiziologice, starea marfa-funcțională a țesuturilor și organelor, precum și reacțiile neuro-endocrino-metabolice de apărare și adaptare la diversele suprasolicități. La rândul lor, factorii exogeni sunt reprezentativi de influențele exercitate în permanență asupra organismului de agenții fizici, chimici, fiziologici, geografici și cosmici din mediul înconjurător. La aceștia se adaugă factorii socio-economici (familiali, culturali, educaționali, profesionali, relaționali etc), producători de reacții stresante de diferite grade.

Capacitatea de apărare, adaptare și rezistență a organismului uman la variațiile mediului intern sau extern fiind limitată, diversele agresiuni sau suprasolicități pot determina alterarea stării de sănătate, ca expresie a „status quo” homeostazic, și instalarea bolii. Ca stare patologică rezultată prin depășirea echilibrului homeostazic sau alterări structurale, boala reprezintă ansamblul fenomenelor obiective și subiective anormale provocate de cauze endogene sau exogene. Numai cunoscând factorii de menținere a sănătății și de producere a bolilor pot fi etichetate, prevenite sau tratate corect stările patologice. De aceea, principiul de bază al medicinei: „Primum non nocere”, impune cunoștințe secunde nu numai de patogeneză, ci și de sanagenză.

Deși conținutul noțiunilor privind viața și sănătatea este perfectibil, cuantumul cunoștințelor de fiziologie acumulat până în prezent asigură baze de plecare corespunzătoare și termenii de referință indispensabili oricărui act medical, fie el curativ, preventiv sau recuperator.

FIZIOLOGIE GENERALĂ ȘI CELULARĂ

1. COMPOZIȚIA CHIMICĂ A MATERIEI VII

În compoziția structurilor care alcătuiesc materia vie se regăsesc elementele chimice constitutive ale materiei nevii (tabelul 1.I). În materia vie, acestea sunt astfel organizate încât participă la formarea unor structuri cu complexitate progresivă, dotate cu proprietatea de a se întreține și a se reproduce.

TABELUL 1.I

Exprimarea procentuală a principalelor elemente chimice
în scoarța pământului și organismul uman

Scoarța terestră		Organismul uman	
O	47	H	63
Si	28	O	25,5
Al	9	C	9,5
Fe	4,5	N	1,4
Ca	3,5	Ca	0,31
Na	2,5	P	0,22
K	2,5	Cl	0,08
Mg	2,2	K	0,06
Ti	0,46	S	0,05
H	0,22	Na	0,03
C	0,19	Mg	0,01

Elementele chimice care există în organismul uman pot fi clasificate în trei grupe: elemente plastice, elemente minerale și oligoelemente (tabelul 1.II):

– elementele plastice (de structură) au ponderea cea mai mare în țesuturile corpului uman. În această grupă sunt incluse: C, O, N, H. La această categorie ar putea fi atașat și fosforul, prezent în acizii nucleici și sulfur, ca și constituent constant al proteinelor;

– elementele minerale (Na, K, Mg, Ca, Cl, P, S) se găsesc în corpul uman sub formă de electroliti, oxizi și săruri minerale;

– oligoelementele sunt prezente în organism în cantități extrem de scăzute (totalul lor nu depășește 7 g la un adult de 70 kg). Ele sunt însă absolut necesare pentru desfășurarea normală a proceselor biologice, de cele mai multe ori cu rol catalitic. Poziția lor în cadrul acestor procese a fost foarte bine stabilită în 1894 de către Gabriel Bertrand, considerat ca inițiator al oligoterapiei: „organismul este o formă de oligarhie în care mase enorme de elemente pasive sunt dominate printr-un număr mic de elemente catalitice”.

TABELUL 1.II

Clasificarea elementelor chimice prezente în organismul uman

Grupa	Proporția în organism	Elementul chimic
Elemente plastice	95%	C, O, N, H
Elemente minerale	4,75%	S, P, Cl, Na, K, Ca, Mg
Oligoelemente	0,25%	F, Fe, Si, Zn, Cu, V, Mn, I, Se, Mo, Ni, Cr, As, Co

Se poate vorbi despre o homeostazie a acestor elemente chimice, deoarece „stocul” existent în organism, care este permanent reimprospătat, trebuie menținut în limite evasconstante, posibil evidențiabile prin metode biochimice. Monitorizarea aport - utilizare - eliminare se impune în mod special în cazul elementelor minerale și al oligoelementelor. Comparativ cu elementele plastice, acestea se găsesc în cantități foarte mici, dar intervenția lor în desfășurarea proceselor biologice reclamă concentrații aproape fixe. Variațiile în afara unor limite destul de strânse antrenează dezechilibre care depășesc sfera lor de distribuție, producând în cascadă disfuncții importante ale sistemelor funcționale. În acest context apare justificată atenția care se acordă cunoașterii homeostaziei acestor elemente.

Abilitatea de a corecta dezechilibrele produse prin variații foarte mici ale unor elemente implică cunoașterea homeostaziei și modului de implicare în procesele fiziologice. Astfel s-a ajuns și la utilizarea termenului de oligoterapie, care indică o metodă terapeutică bazată pe administrare de oligoelemente și care are de fapt un sens mai larg, de utilizare a unor elemente chimice care aparțin și grupei elementelor plastice (exemplu: fosfor, sulf) sau unor elemente minerale (exemplu: magnezin, potasiu etc.). Oligoterapia nu reprezintă o expresie terapeutică unitară, ci i se descriu trei forme: catalitică, nutrițională și farmacologică.

Oligoterapia catalitică, ca primă formă de utilizare sistematică a elementelor minerale, a fost introdusă la începutul secolului XX de către Jacques Ménétrier. A doua tendință în utilizarea sistematică a elementelor minerale și, în special, a oligoelementelor o constituie oligoterapia nutrițională. Includerea aspectului nutrițional în rațiunile de conduită terapeutică cu minerale a fost posibilă ca urmare a cristalizării unei „științe a alimentației”, care oferă posibilitatea monitorizării aportului alimentar de minerale. Când aportul este insuficient, este favorizată instalarea unei stări de carență, caracterizată prin tulburări biochimice, cu sau fără expresie clinică. În funcție de gradul de deficit, aportul excesiv al unui element antrenează un cadru toxicologic cu manifestări a căror intensitate este de asemenea de proporțională cu „suplimentul” prezent în organism. Cea mai recentă formă de utilizare terapeutică a elementelor minerale și a oligoelementelor o constituie oligoterapia farmacologică. Elementele chimice sunt utilizate astfel ca „medicamente” în tratamentul unor afecțiuni, prin administrarea unor doze crescute, aproape de toxicitate, definite ca doze farmacologice.

1.1. ELEMENTE CHIMICE ALE MATERIEI VII

Elementele plastice. Acest grup include patru din elementele care au ponderea cea mai mare în organismele vii: hidrogenul, oxigenul, carbonul și azotul. Ele reprezintă aproximativ 96% din materia vie și dețin o serie de particularități de reacție care le permite să „clădească” compuși de bază ai materiei vii. Capacitatea de a forma cu ușurință legături covalente și posibilitatea atomilor de carbon de a se lega între ei generând catene liniare, ramificate sau ciclice stau la baza existenței unei mari varietăți de molecule organice. Implicarea acestor elemente în structurile organice este dublată de intervenția sau/și de necesitatea prezenței lor în desfășurarea normală a proceselor fiziologice.

Hidrogenul. Este un element chimic cu mare răspândire în univers. La nivelul suprafeței terestre, hidrogenul se găsește sub forma a numeroase combinații, dintre care cele mai importante sunt apa, formă srb care intră în ciclul vital, și combinațiile organice. Hidrogenul nu întreține viața, dar prezența sa în structurile organice ale materiei vii și implicățiile funcționale îi conferă o importanță deosebită: prezența sa în moleculele grăsimilor, hidraților de carbon și lipidelor îl implică în funcționalitatea acestora.

În organismul uman, hidrogenul este generat în cursul proceselor metabolice, ca rezultat în special al disocierii unor compuși volatili (H₂CO₃) sau nevolatili (acid piruvic, acid lactic). Concentrația de ioni de hidrogen într-o soluție determină gradul de aciditate al soluției respective. Parametrul este definit ca pH și variază în limite foarte strânse în mediile biologice. Ionii de hidrogen pot fi considerați specii înalt reactive și, deși se găsesc în concentrații foarte mici comparativ cu alți ioni (4×10^{-8} Eq/l), modificări extrem de mici ale concentrației lor se pot însoți de alterări însemnate ale proceselor biologice.

În organism, hidrogenul poate fi produs la nivelul colonului, în raport direct cu substratul degradat la acest nivel: fasolca și hidrații de carbon furnizează o cantitate mai mare de H⁺. Hidrogenul provenit în

special din disocierea H₂CO₃, constituie un stimul pentru chemoreceptorii centrali și periferici de la nivelul zonelor receptoare implicate în reglarea funcției respiratorii și circulației. Tulburările produse prin modificarea concentrației H⁺ sunt cunoscute sub numele de acidoze și alcaloze, ambele tipuri de modificări fiind în funcție de mecanismul de producere, respiratorii sau metabolice. Producția de acizi, deci de substrat generator de H⁺, este mare (50–100 mEq H⁺/zi la adult cu o dietă echilibrată), existând permanent pericolul modificării pH-ului mediilor biologice. În replică, organismul dispune de sisteme specializate (sisteme tampon) care sunt capabile să mențină valoarea acestui parametru în limite foarte strânse de variație.

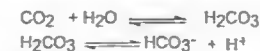
Oxigenul. Este un component principal ca pondere și, în special, ca importanță al materiei din organismele vii (23,7% din masa uscată a organismelor animale). Oxigenul are efecte benefice, fiind indispensabil pentru producerea de energie în organism, precum și efecte nocive, prin procesele de peroxidare.

Efectele benefice ale oxigenului: la nivel celular, oxigenul este incorporat direct în moleculele organice sau este acceptor de electroni; participă, la nivelul celulei endoteliale, la formarea monoxidului de azot (NO), care este implicat activ în reactivitatea vasculară.

Efectele nefavorabile ale oxigenului sunt consecința unui proces de activare în urma căruia se formează specii înalt reactive: oxigenul singlet, anionul superoxid, anionul hidroxil, care reacționează ca atare sau prin producție de peroxizi la nivelul membranelor biologice. În cadrul sistemelor biologice există sisteme eficiente de protecție care inhibă excesul de peroxizi la diferite niveluri de formare: GSH peroxidaza; superoxid dismutaza (SOD); vitamina E; vitamina C; seleniul; metionina.

Carbonul. Este un element care se găsește în natură în stare elementară cristalizat (diamant, grafit), dar și în numeroase combinații organice și anorganice. Abundența în materia vie (37–50%) și particularitățile sale de reacție care stau la baza imensei varietăți de molecule organice îi justifică prezența în grupa elementelor plastice, cu importanță majoră, atât structural, cât și funcțional. Pentru „lumea vie”, bioxidul de carbon este de o extremă importanță, fiind forma sub care carbonul intră în ciclul vital. CO₂, ca produs final, nemetabolizabil, al reacțiilor oxidative celulare, este eliminat din organism în cursul expirației, constituind, împreună cu cel produs prin degradarea plantelor și animalelor, volumul total de CO₂ din atmosferă.

Bioxidul de carbon produs în organism contribuie la generarea unor însemnate cantități de H⁺:



H⁺ formați influențează permanent valoarea pH-ului mediilor biologice. Bioxidul de carbon este un factor de stimulare al zonelor reflexogene implicate în reglarea respiratorie și cardio-vasculară, dar are și posibilitatea de influențare directă a centrilor respiratori, controlând astfel eliminările de CO₂ pe cale pulmonară.

Date recente (1990) plasează CO ca factor endogen gazos, cu manifestări de radical liber. CO endogen, produs ca urmare a degradării hemului sub acțiunea hemoxigenazei, participă la autoreglarea tonusului vascular (Graser, 1990) prin acțiune asupra musculaturii netede vasculare.

Azotul. Este prezent în toate organismele vii sub forma unor combinații organice de o mare diversitate (proteine, acizi nucleici, vitamine etc.). Concentrația sa este mai mare în organismele animale (12,8% din substanța uscată), comparativ cu regnul vegetal (3,3%). Deși azotul are o pondere mare (4/5) în aerul atmosferic, unde se găsește sub formă moleculară, nu poate fi asimilat direct de către plantele și animalele superioare. Preluarea sa se face din sol, unde forma asimilabilă are cel puțin două surse: acțiunea unor bacterii, care îl preiau direct și îl pot transforma în combinații azotate asimilabile, sau din apa de ploaie. Azotul asimilabil este extras din sol de către plantele superioare sub formă de amoniac și azotați și antrenat în procese metabolice proprii, din care rezultă aminoacizi esențiali. Ulterior, acești compuși organici vor putea fi preluați de către animale sub formă de hrană. Prelucrarea hranei în organismul animal are ca rezultat eliminarea prin materii fecale și urină a unor reziduuri care conțin azot. Compuși organici azotați din aceste reziduuri împreună cu cei rezultați din putrezirea corpurilor de animale și plante revin în sol. Se închide astfel un ciclu de evoluție, deoarece aceștia pot fi degradați până la amoniac și ioni azotați, cu posibilitatea de preluare de către plante.

În organism, azotul are un rol structural important, fiind prezent în majoritatea combinațiilor organice. Rolul său funcțional este indirect, prin funcționalitatea structurilor care îl conțin. În organismul uman adult, se găsește o cantitate apreciabilă (1 l), dizolvat în umori sau în lipide (teaca de mielină, depozite adipose subcutanate sau poziționate în jurul organelor). Azotul este implicat în accidente de depresiune și, în condiții hiperbare, are efecte narcotice. Fiind inert din punct de vedere al participării la funcția respiratorie, Cl este utilizat la evaluarea unor parametri respiratori (determinarea volumului rezidual, a capacității reziduale funcționale și a uniformității ventilației).

Elementele minerale. În această grupă se găsesc elementele chimice prezente sub formă ionizată sau în diverse combinații, a căror pondere totală este de 4,75%. Deși cantitativ mai reduse comparativ cu elementele plastice, componentele acestui grup sunt esențiale pentru desfășurarea normală a funcțiilor vitale (fenomene membranare, repartiția apei, răspuns celular specific etc.). Sunt răspândite atât în celule, cât și în umorile organismului (plasmă, secreții digestive, LCR etc.) și sunt caracterizate printr-o concentrație relativ constantă. Variații cantitative în afara unor limite, statistic considerate ca fiind normale, atrag disfuncții exteriorizate prin simptomatologie caracteristică.

Menținerea homeostaziei lor se realizează printr-un bilanț (ideal nul) între aport – eliminare. Există multiple circumstanțe care pot modifica acest echilibru, evidențiate prin modificări în principal ale concentrației acestor elemente în lichidele biologice.

Corectarea eventualelor dezechilibre presupune o cunoaștere a concentrației lor, în umorile organismului, sursele alimentare care asigură aportul, metabolismul și căile lor de eliminare, implicațiile lor fiziologice și manifestările care apar în tulburările homeostaziei lor.

Sodiu Face parte din elementele plastice ale organismului deoarece, împreună cu alte 10 clemente (C, O, H, N, K, Ca, Mg, Cl, P, S), alcătuiește 99,75% din matricea vie. El aparține grupării metalelor alcaline, este un element monovalent, cu greutatea moleculară 23 g. Are o răspândire largă în natură (2% din totalitatea atomilor din scoarța terestră). În organismul uman, cantitatea totală de sodiu este în jur de 60 mEq/kg corp (aproximativ 4 200 mEq la un subiect de 70 kg) și poate fi considerat un ion caracteristic umorilor organismului datorită preponderenței sale în compartimentul extracelular (aproape 50% din totalul de sodiu).

Necesar, aport, eliminare: balanța sodică presupune un echilibru între aportul și utilizările/eliminările de sodiu și este exprimată printr-o valoare relativ constantă a natremiei (concentrația plasmatică a sodiului) de 140 ± 5 mEq/l. Se consideră că necesarul de 3–5 g NaCl/zi poate să prevină instalarea unui bilanț sodic negativ, în sensul că această cantitate este suficientă pentru a înlocui pierderile prin urină și transpirație. În sarcină, lactație, efort fizic intens poate apărea un apetit de sodiu crescut.

Aportul sodic se realizează: în principal prin ingestie de NaCl; consum de alimente care conțin NaCl, ape minerale bogate în NaCl.

Eliminarea de sodiu din organism se realizează pe cale: renală; digestivă; prin sudoare. Eliminarea digestivă este neînsemnată, deoarece Na⁺ prezent în intestin (provenit din alimente sau din secrețiile digestive) este aproape în totalitate absorbit. Pierderile de sodiu pe cale cutanată sunt de asemenea reduse (10–100 mEq/24 ore) și sunt influențate de cantitatea de sudoare. Cea mai mare parte a sodiului este eliminat pe cale renală (între 0–500 mEq/zi), fiind influențată de cantitatea filtrată la nivel glomerular; concentrația plasmatică a Na⁺; unele mecanisme umorale complexe care asociază și controlul eliminărilor de apă.

Roluri fiziologice: în interrelație cu alți ioni, sodiul este implicat în numeroase procese: echilibrul hidroelectrolitic; excitabilitatea celulară; menținerea potențialului membranar de repaus; determinarea valorii presiunii osmotice; echilibrul acido-bazic; transport transmembranar de substanțe; determinarea volumului celular.

La subiecții sănătoși, Na⁺ și Cl⁻ sunt responsabili pentru 80% din valoarea presiunii osmotice a plasmiei. Volumul plasmatic este influențat de balanța de NaCl. Efectul modificărilor concentrației de Na⁺ se manifestă la nivelul circulației sistemice și antrenează prompt sisteme corectoare. De exemplu: osmolaritatea plasmiei este un stimul pentru stimularea centrilor setei și pentru eliberarea de hormon antidiuretic (ADH). Pragul osmotic critic pentru descărcările de ADH este de 286 mOsm/l, dacă creșterea osmolarității este consecința creșterii concentrației de Na⁺, și de 282 mOsm/l, dacă se realizează prin oprirea ingestiei de apă. Osmolaritatea plasmiei influențează volumul celular, putând provoca turgescența celulei (dacă presiunea osmotică extracelulară este mai mică decât a sectorului intracelular) sau ratatinare celulară (dacă presiunea osmotică extracelulară depășește valoarea presiunii osmotice intracelulare).

Valoarea potențialului membranar este specifică fiecărui tip celular și este expresia unei diferențe de repartiție a sarcinilor electrice (în principal K⁺, Na⁺, Cl⁻, anioni proteici) de o parte și de alta a membranei. Menținerea strictă a acestei repartiții se realizează cu participarea unor sisteme de transport activ (vezi Na⁺, K⁺-ATPaza și potențialul membranar de repaus).

Gradientul de Na⁺ este folosit pentru transportul transmembranar al unor substanțe. Transportul celor mai mulți ioni sau al unor substanțe nutritive împotriva gradientului electro-chimic se realizează printr-un mecanism de transport activ secundar dependent de Na⁺.

Tulburări ale metabolismului sodiului: din punct de vedere cantitativ, tulburările metabolismului sodiului îmbracă două aspecte: hiponatremia și hipernatremia.

Hiponatremia este considerată la o concentrație sub 135 mEq/l a sodiului plasmatic; este consecința unei cantități crescute de apă mai degrabă decât a unei cantități scăzute de sodiu. Hipotonicitatea plasmatică implică totdeauna hiponatremie, în timp ce hiponatremia poate fi întâlnită în condiții de izotonicitate, hipertonicitate și de hipotonicitate.

a) Hipotonicitatea izotonică (pseudohiponatremia) se poate datora unui artefact de laborator. Astfel, dacă se raportează cantitatea de sodiu la volumul plasmatic (total și nu la volumul de fază apoasă, atunci când există hiperlipidemie sau/și hiperproteinemie) valoarea concentrației sodiului plasmatic este artificial scăzută.

b) Hiponatremia hipertonică se caracterizează printr-o situație în care osmolaritatea plasmiei este normală, dar concentrația Na⁺ plasmatic este scăzută; în acest caz osmolaritatea plasmiei este dată de alte particule osmotice active (glucoza).

c) Hiponatremia hipotonică (hiponatremia adevărată) are semnificație clinică dacă sodiul plasmatic are o valoare mai mică de 125 mEq/l, ceea ce determină o osmolaritate plasmatică mai mică decât 250 mOsm/kg corp.

Hipernatremia este considerată la valori mai mari de 155 mEq/l și implică totdeauna hipertonicitate.

Potasiu Aparține grupei metalelor alcaline; este un element monovalent, cu greutate atomică 39, cu largă răspândire în natură. Capitalul potasic al organismului uman este de aproximativ 150 g (50 mmol/kg corp), localizat cu predominanță (90%) intracelular. Conținutul în potasiu este mai scăzut la persoanele care dețin o cantitate mai mare de țesut adipos (persoane în vârstă sau obeze), deoarece țesutul adipos este sărac în potasiu. $\text{Potasiu} = 5-7 \text{ mEq/l}$

Necesar, aport, eliminare: dieta echilibrată furnizează potasiu între 2–4 g/zi, suficient pentru a preveni orice dezechilibru. Alimentele cele mai bogate în potasiu sunt fructele și legumele uscate, carnea, peștele afumat. Eliminarea din organism se face atât pe cale renală, cât și extrarenală (digestivă, prin sudoare). Secreția de potasiu de către epiteliul colonului este dependentă de debit și, de aceea, cantitatea eliminată prin fecale în cazul tranzitului intestinal accelerat (diaree hidroelectrolitică) este redusă. Rinichiul realizează o eliminare de potasiu în funcție de aport (în condițiile unei absorbții digestive de 70 mmol/24 h, excreția de potasiu prin urină este de 10% din cantitatea filtrată).

Roluri fiziologice: desfășurarea la parametri optimi a numeroaselor procese implică participarea potasiului în: excitabilitatea celulară; procesele de transport; eliberarea de hormoni; activarea limfocitelor; fenomenele electrice membranare; determinarea valorii presiunii osmotice; echilibrul acido-bazic; contractia musculară; procesele metabolice; schimburile ionice de la nivelul epiteliilor tubului urinar.

K⁺ este implicat în generarea și menținerea potențialului de membrană la nivelul celor mai multe celule. Valoarea potențialului de membrană este influențată de potențialul de echilibru pentru K⁺ (E_K) și de selectivitatea membranei celulare pentru K⁺.

Concentrația extracelulară a potasiului influențează eliberarea unor hormoni (insulină, glucocorticoizi, aldosteron) și inhibă eliberarea ouabainei.

În excitabilitatea musculară, K⁺ se manifestă ca un antagonist al Ca²⁺.

K⁺ influențează valoarea presiunii osmotice și, astfel, contribuie și la determinarea volumului celular.

Tulburări ale metabolismului potasiului: deoarece concentrația de K⁺ este mai mare în intracelular, valorile concentrației sale plasmatic (care se determină uzual) nu reflectă real valoarea capitalului potasic total al organismului, dar ele sunt luate în considerație atunci când sunt corelate și cu alte modificări (de concentrație ale altor ioni, ECG, semne clinice). Excesul sau deficitul de potasiu al organismului sunt definite ca hiperpotasemie (hiperkaliemie) și hipopotasemie (hipokaliemie).

Hipokaliemia este considerată la valori serice ale potasiului mai mici de 3,5 mEq/l și este asociată de cele mai multe ori și de o scădere a potasiului intracelular.

Hiperkaliemia este o manifestare mai puțin frecventă decât hipokaliemia și, în majoritatea cazurilor, nu semnifică o retenție de K^+ în organism, ci, mai curând, o modificare de repartitie a K^+ între compartimentul intra- și extracelular.

În practica medicală, semnele care traduc modificări ale valorilor potasemiei se asociază cu modificări specifice ale traseului electrocardiografic, deși nu se poate face o corelație a modificării traseului cu gradul de depleție sau încărcare potasică a organismului.

Calciul Este un element bivalent, cu greutate moleculară 40; împreună cu strontiul, bariul și radion face parte din grupa metalelor alcalinoteroase ale grupe I-II-a a sistemului periodic. În organismul uman, calciul este prezent în toate compartimentele hidroionice cu predominanță în sectorul extracelular. Din punct de vedere al disponibilității de mobilizare, calciul poate fi împărțit în două compartimente: un compartiment de schimb ușor (calciul plasmatic; calciul din lichidele extracelulare; calciul din tesuturile moi; o fracțiune de calciu din oase) și o fracțiune de calciu greu mobilizabil (din interiorul cristalelor osoase).

Necesar aport, eliminare: necesarul este asigurat prin alimentație (0,6-0,8 g/zi), fiind crescut în perioadă de creștere, sarcină și alăptare. Alimentele care conțin calciu sunt: laptele, brânzeturile, ouăle, ape minerale caldă etc. Un regim fără produse lactate nu furnizează mai mult de 400-500 mg de calciu pe zi. Absorbția calciului are loc în special la nivelul duodenului, sub influența vitaminei D, calcitoninei și a parathormonului. Concentrația plasmatică a calciului (calcemia) este de 4,5-5,5 mEq/l (9-11 mg/dl).

Calciul se elimină prin urină și fecale. Eliminarea renală privește numai fracțiunea difuzibilă și reprezintă diferența dintre cantitatea filtrată și cea reabsorbită (aproximativ 99% din cantitatea filtrată) la nivel tubular. Urina alcalină favorizează precipitarea sărurilor de calciu și formarea litiazei renale.

Roluri fiziologice: în organism, calciul are rol structural și funcțional.

- **Rolul structural:** împreună cu alte elemente (PO_4^{3-} , HCO_3^- , Na^+ , K^+ , Mg^{2+}) intră în structura scheletului și a dinților (75% din sărurile minerale care intră în alcătuirea țesutului osos sunt reprezentate de fosfatul tricalcic, prezent sub forma cristalelor de hidroxiapatită, la care sunt adsorbiți alți ioni).

- **Rolul funcțional:** calciul este un ion cu implicații majore în funcționalitatea celulei și în desfășurarea unor procese fiziologice cum ar fi: controlul fenomenelor membranare de la nivelul mușchiului, nervului și al altor celule, ca expresie a excitabilității; participarea calciului ca mesager secund (contractie musculară, cuplarea proceselor de excitație - secreție celulară); coagularea sângelui; producerea secreției lactate; procesele de adezivitate celulară și de stabilizare membranară; în echilibrul acido-bazic (tampon al sărurilor acide).

Tulburări ale metabolismului calciului: hipocalcemia crește excitabilitatea celulară prin creșterea permeabilității membranelor pentru sodiu și potasiu. La nivelul ganglionilor vegetativi este exprimată printr-o descărcare mai rapidă a neuronilor sub influența acetilcolinei, dar și prin posibilitatea unor descărcări spontane și repetate.

În hipercalemie este încetinită sau chiar oprită transmisia la nivelul ganglionilor vegetativi și a sinapselor neuro-musculare, ca urmare, probabil, a scăderii permeabilității pentru sodiu și potasiu a membranei celulare.

Magneziul Face parte din grupa elementelor minerale majore, prezent în organismul adult în cantitate de 20-30 g; aproximativ 34% este cantonal în compartimentul celular (2,6 mEq/l), iar 1% din cantitatea totală se găsește în sectorul extracelular (concentrație plasmatică 0,7-1 mmol/l).

Necesar aport, eliminare: necesarul zilnic este variabil (330 mg/zi) în funcție de vârstă și de starea organismului și poate fi asigurat de o dietă care conține alimente bogate în magneziu (cacao pudră, germeni de grâu; faină de soia; uci; porumb; banane; pâine completă; smochine; spanac; creveți).

Eliminările de magneziu se fac în special prin urină și constituie un mecanism homeostatic. Rinichiul asigură un bilanț al de magneziu prin adaptarea excreției urinare la absorbția netă digestivă. Eficiența adaptării funcției renale apare evidentă în special la creșteri mari ale aportului, când eliminările renale de magneziu cresc corespunzător, în timp ce magneziemia înregistrează numai creșteri moderate. Se pare că organismul este mai puțin protejat la cantitățile scăzute de magneziu (aport scăzut, pierderi extrarenale mari). Eliminările extrarenale sunt neglijabile cantitativ la subiecți normali.

Roluri fiziologice: magneziul participă la mecanismele de apărare ale organismului, fiind considerat un element antistres, antianoxic, antiaterogenic, antiinflamator și radioprotector. Stimulează fagocitoza și producția de anticorpi și interferon. Activează mai mult de 300 de enzime și este indispensabil pentru contractia și relaxarea musculară. Efectele sale asupra excitabilității neuro-musculare sunt asemănătoare cu cele ale calciului. La nivelul mușchiului cardiac magneziul se comportă însă ca un antagonist al calciului, determinând o scădere a excitabilității și conductibilității miocardului. Sărurile de magneziu au efect bradicardizant și sunt utilizate în corectarea tulburărilor de ritm. În plus, magneziul realizează protecția peretelui vascular în fața leziunilor aterosclerotice. Efectul său antiischemic și antianginos a determinat utilizarea sa, sub forma unor preparate standardizate, în tratamentul afecțiunilor coronariene. Datorită efectului său ușor antispastic pe musculatura intestinală și la nivelul sfincterului Oddi, sulfatul de magneziu este utilizat cu efect de creștere a fluxului biliar și de regulator al peristaltismului. Magneziului i se atribuie, de asemenea, efecte relaxante la nivelul musculaturii netede bronșice și vasculare.

Magneziul este un factor stabilizator al proceselor celulare (influențează permeabilitatea membranei, reglând activitatea canalelor de potasiu, cu menținerea potasiului în celule). Magneziul intervine în sinteza și activitatea comunilor macroergici, precum și în sinteza transportorilor de ioni de hidrogen și electroni (flavin nucleotide, fosfopiridin nucleotide, coenzima A).

Magneziul este antiagregant plachetar și intervine în metabolismul glucidic, proteic, lipidic. În metabolismul fosfo-calcic are acțiuni asemănătoare cu vitamina D și stimulează parathormonul.

Tulburări ale metabolismului magneziului: carența de magneziu poate apărea fie datorită unui deficit de aport, fie datorită unor pierderi excesive, putând fi întâlnită în următoarele circumstanțe: aport alimentar insuficient (consumul de alimente rafinate a redus dramatic conținutul în magneziu al alimentelor; aport ineficient, în caz de malabsorbție: diaree, rezecții gastrice, hepatită și alcoolism; alimentație parenterală prelungită fără suplimentare cu magneziu; necesar crescut: graviditate, alăptare, perioadă de creștere) sau pierderilor excesive (poliuria diabetică, administrarea intempestivă a diureticelor).

Deficitul cronic de magneziu se manifestă prin: simptome de origine centrală (hiperemotivitate, anxietate, cefalee, astenie, insomnie); simptome periferice (parestezii, crampe musculare, crize tetaniforme); simptome locale: cutanate (fragilitate a fanerelor), cardiace (palpitații, dureri precordiale), pulmonare (dispnee), vasculare (sindrom Raynaud), gastro-intestinale („colon iritabil“), diskinezii biliare și hiperexcitabilitate neuro-musculară.

Excesul de magneziu în organism poate avea drept cauză afectarea funcției renale, intoxicații profesionale sau neprofesionale. Acumularea de magneziu se caracterizează prin somolență, hiporeflexie, bradicardie și deprimarea funcției respiratorii, sete, senzație de căldură, anorexie, reducere ponderală, diminuarea tonusului muscular și a excitabilității nervoase.

Clorul Este un element monovalent; are greutatea moleculară 71. În organismul uman clorul se găsește aproape în totalitate sub formă de anion. Cantitatea totală de clor din organism este de 2 000 mmol (30-35 mmol/kg corp).

Necesar, aport, eliminare: sursa principală de clor este NaCl, iar absorbția este activă, la nivel intestinal. Eliminarea se realizează în principal prin rinichi, dar și prin materii fecale și prin transpirație.

Roluri fiziologice: datorită concentrațiilor relativ mari și diferite între mediile intra- și extracelulare și a coeficientului de permeabilitate membranară relativ mare, ionii de clor sunt importanți, alături de sodiu și potasiu, în ecuația ce determină potențialul membranar (Goldmann-Hodgkin-Katz).

Transportul clorului prin membranele celulare este esențial legat de mișcarea sodiului (guvernată de pompa de sodiu și de căile disponibile pentru transportul său pasiv; canale și transportori), precum și de particularitățile celulei privind transportul corelat al clorului și anionului bicarbonic. Căile de transport ale clorului prin plasmalema sunt canale și transportori: CLC (canale de clor), CFTR (canale de tip reglator al conductanței transmembranare asociat cu fibroza chistică), CLCA (canale de clor activate de calciu), canale anionice dependente de liganzi (receptori GABA-A și pentru glicină). La acestea se adaugă canalele de clor intracelulare de tip CLIC și p64.

Tulburări ale concentrației de clor: variațiile concentrației de clor sunt mai ales paralele cu ale natremiei, dar pot fi și independente de natremie.

Hipocloremia reprezintă scăderea concentrației de clor din plasmă sub valoarea de 80 mmol/l. Cauzele hipocloremiei sunt depleția ca urmare a pierderilor de lichide digestive (în special de suc gastric) sau administrarea de diuretice. Manifestările clinice sunt puțin evidente.

Hipercloremia reprezintă creșterea concentrației de clor în plasmă peste valoarea de 110 mmol/l. Se asociază cu tulburări ale echilibrului acido-bazic (în special, acidoze metabolice) și cu tulburări ale natriemiei. Cauze: aport crescut și funcție renală alterată; absorbție intestinală crescută; deshidratare.

Fosforul Este un element chimic situat în grupa a V-a a sistemului periodic al elementelor, cu greutate atomică 31. În organismul uman, fosforul reprezintă aproximativ 1% din greutatea corporală și este prezent în combinații organice sau anorganice atât în celulă, cât și în compartimentul extracelular. În plasmă, fosforul se găsește ca radical fosfat, sub formă: anorganică (1,7–2,6 mEq/l la adult), prezent ca amestec de fosfați monobazici și dibazici, și organică: legat de lipide (7–8 mg/dl), prezent în esteri fosforici (1 mg/dl). În celulă, fosforul este mai concentrat în comparație cu sectorul extracelular (poate ajunge la 100 mEq/l) găsindu-se în combinații organice, înglobat în acizi nucleici, proteine, ATP, creatin fosfat.

Necesar, aport, eliminare: necesarul zilnic de fosfor este cotat la o valoare de aproximativ 500–1 100 mg/zi, mai crescute la adolescenți, la femeile însărcinate și la cele care alăptează. Alimentația asigură acest necesar și furnizează fosfor în special sub formă organică, dar, în cantități mici, și sub formă anorganică (fosfați, carbonați, bicarbonați). Aproape toate alimentele conțin fosfor (cacao, gălbenuș de ou, pește, nuci, legume uscate, pâine, orez, fructe proaspete) și, de aceea, la om nu se întâlnește o carență de fosfor.

Eliminările de fosfați se fac prin materii fecale și urină. Eliminările prin materii fecale sunt reduse, iar în urină reprezintă aproximativ 25 mEq/l, fiind sub influența parathormonului.

Implicații fiziologice: în celule, fosforul este implicat într-o mare multitudine de procese: metabolismul hidraților de carbon, acizilor grași și aminoacizilor; reglarea canalelor ionice; reglarea proceselor de transport; reglarea activității unor enzime; proliferarea celulară; echilibrul acido-bazic; la toate procesele fiziologice care antrenează participarea nucleotidelor, acizilor nucleici, fosfolipidelor, compușilor macroergici (ATP, CF). Este component al cAMP, cGMP, IP₃, cunoscuți ca mesageri secunzi. Intervine în mecanismul de acțiune al hormonilor. Intră în structura unor compuși lipidici (cefaline, lecitiine) sau proteici (fosfoproteine). Împreună cu calciul, fosforul este elementul mineral cu pondere deosebită în formarea osului. Mineralizarea osului depinde de concentrația de calciu și fosfor.

Tulburări ale metabolismului fosfaților: scăderea concentrației plasmatice a fosforului (hipofosfatemie) este consecința unei ingestii scăzute, depleții crescute de fosfați sau a unor modificări ale repartiției fosforului între sectorul intra-/extracelular, și anume: transferul de fosfați din spațiul extracelular în celulă (modificările de repartiție ale fosforului între cele două compartimente pot masca o depleție de fosfați sau o pot accentua). Creșterea concentrației plasmatice a fosforului (hiperfosfatemie) se poate datora: defectelor în eliminările renale (insuficiență renală, hipoparatiroidie); ingestiei în exces; pierderilor celulare; demineralizării osoase. Consecințele excesului de fosfați constau în formarea de cristale (prin complexare cu calciul), urmată de depunerea lor la nivelul articulațiilor și al pielii.

Sulfur Este un element mineral fundamental al materiei vii. În organismul uman adult se găsesc în medie 160 g de sulf înglobat în compuși cu rol structural și funcțional: cistina, cisteina, metionina, heparina, insulina, glutatoniul, keratina, tiamina, CoA, acidul taurocolic, sulfocianati, acidul condroitinsulfuric (din cartilaje, tendoane și matricea osoasă), cerebrozide esterificate cu acid sulfuric (sulfolipide) concentrate în substanța albă a sistemului nervos.

Necesar, aport, eliminare: sursa principală de sulf pentru organism o constituie metionina și cistina, dar se consideră că o dietă care conține aminoacizi în cantități suficiente poate asigura necesarul zilnic de sulf (5 g). Carne, pește, viscerele, ouăle, laptele, brânzeturile oferă o cantitate apreciabilă și ușor asimilabilă de sulf. Alte alimente, deși au un conținut suficient de mare de sulf nu au același grad de asimilare și utilizare a sulfurii (nucile, legumele uscate, usturoiul, varza).

Eliminarea sulfurii se realizează prin urină (1–2 g/zi); din această cantitate 85–90% îl reprezintă sulfurul anorganic rezultat din catabolismul aminoacizilor sulfurați, iar restul este reprezentat de esteri organici proveniți în urma reacțiilor de detoxifiere.

Implicații fiziologice: apartenența sulfurii la numeroase structuri îi arată implicarea funcțională indirectă la funcțiile vitale. Prezența punților disulfidice (–S–S) în structura proteinelor are un rol determinant pentru conformația proteinei. Sulfurul are funcții energetice, plastice și de detoxifiere. Sulfurul își găsește utilizarea în tratamentul unor afecțiuni dermatologice (acnee, eczeme), manifestărilor alergice, manifestărilor reumatismale de natură inflamatorie sau degenerativă.

Oligoelementele. În organismul uman se găsește un număr relativ mare de elemente chimice, a căror pondere este mai mică de 0,01% din greutatea corporală. Ele au fost incluse în categoria oligoelementelor (oligos = puțin): fier, fluor, siliciu, zinc, cupru, vanadiu, mangan, iod, seleniu, molibden, nichel, crom, arsen, cobalt. Dintre aceste elemente, unele se găsesc în cantitate totală mai mică de 10 mg și pot fi denumite „ultramicroelemente”. Cantitățile mici sunt însă în discordanță cu implicațiile majore pe care le au în organism ca și constituent sau factor de cataliză a reacțiilor enzimatice, în transportul gazelor respiratorii, în acțiunile unor hormoni etc.

a) Oligoelemente esențiale. Cobaltul Este un oligoelement esențial, cunoscut ca „reglatr al sistemului neuro-vegetativ”, indicat în distoniile neurovegetative cu manifestări în special la nivel vascular.

Necesar, aport, eliminare: necesarul de cobalt este de 0,0001 mg/zi, iar organismul uman dispune de o cantitate redusă (1,5 mg). Sursa de cobalt pentru organism este alimentară: carnea, ficatul de vită, ouăle și brânza sunt considerate bogate în cobalt, în timp ce fructele, cerealele și legumele sunt aproape lipsite de acest element.

Implicații fiziologice: cobaltul este constituent al vitaminei B₁₂ și prezența sa este necesară unui număr mare de reacții enzimatice. Permite încorporarea Fe în molecula de protoporfirină, constituind astfel un factor de stimulare a eritropoiezei. Favorizează captarea iodului de către glanda tiroidă. Cobaltul mai este, de asemenea, implicat în absorbția unor oligoelemente și în dezvoltarea caracterelor sexuale. Datorită acțiunii sale vasodilatatoare și hipotensive, cobaltul este utilizat în oligoterapia catalitică, în tulburări vasomotorii ale extremităților, arteriopatii obliterante și cefalee de etiologie vasculară.

Cromul Este considerat un oligoelement esențial datorită implicării sale în procesele metabolice. În special în metabolismul hidraților de carbon.

Necesar, aport, eliminare: cantitatea totală de crom din organismul uman adult este de 6 mg (concentrația serică variază între 0,1–2 μg/l). Determinarea nevoilor zilnice de crom este subiectul a numeroase controverse; deficitul de crom fiind descris în special la diabetici, persoane în vârstă. Nevoile zilnice sunt în medie 40 μg/zi. Alimentele bogate în crom: cereale nerafinate, sparanghel, crustacee, ciuperci, ficat de vită, nuci, piper negru și drojdie de bere.

Implicații fiziologice: cromul scade cantitatea de insulină circulantă, facilitează utilizarea glucozei și diminuează procesele de lipogeneză. Cromul nu are o activitate hipoglicemiantă „per se”, ci numai în prezența insulinei, fiind considerat co-factor al insulinei. Cromul scade colesterolul total, dar crește fracțiunea colesterol-LDH. Cromul este implicat în controlul senzației de foame și este considerat ca un factor important al dezvoltării fetale.

Tulburări ale metabolismului cromului: carența de crom produce o scădere a toleranței la glucoză, hiperinsulinemie, creșterea colesterolemiei, a trigliceridelor și a acizilor grași și poate fi întâlnită și în timpul activităților fizice intense, când utilizarea glucozei este intensă și eliminările urinare de crom sunt crescute și, de asemenea, odată cu înaintarea în vârstă.

Cuprul Este un constituent normal al organismului uman, prezența sa influențând numeroase procese metabolice.

Necesar, aport, eliminare: organismul adult conține 80–120 mg de cupru, cantonat în mușchi, oase, ficat, creier, sânge. În toate celulele sistemului reticulo-endotelial este depozitat sub formă de hepatocuprină. Ficatul are concentrația cea mai mare de cupru, iar în țesutul hepatic al fătului, concentrația acestui element atinge o valoare de 5–10 ori mai mare comparativ cu a adultului. În sânge, cuprul este prezent atât în hematii (93–114 μg/dl masă eritrocitară), cât și în plasmă (în medie de 90 μg/l).

Necesarul nutrițional de 1,35–1,65 mg/zi este asigurat din alimente: ficat, crustacee, ciocolată, nuci, cereale, legume și fructe.

Implicații fiziologice: cuprul intră în constituția unor enzime (superoxid dismutaza – SOD, monoaminooxidaza – MAO, catalaza, tiroxinaza, citocrom oxidaza, ascorbic acid oxidaza); participă la sinteza melaninei, melaninei; este necesar pentru formarea elastinei și pentru desfășurarea normală a procesului de osificare. Împreună cu zincul și nichelul, asigură menținerea senzației gustative, iar cu molibdenul intervin în mobilizarea fierului.

Tulburări ale metabolismului cuprului: carența de cupru poate fi consecința unui aport inadecvat sau a unor eliminări excesive. Aportul inadecvat poate fi interpretat ca aport insuficient real sau ca aport insuficient circumstanțial. În cazul unei alimentații exclusiv parenterale și la nou-născuții hrăniți numai cu lapte de vacă (care are un conținut foarte scăzut de cupru) se poate instala carența de cupru.

Tulburări ale metabolismului cuprului se întâlnesc în cadrul a două afecțiuni ereditare: sindromul Menkés (afecțiune ereditară, cu transmitere recesivă legată de cromozomul X, caracterizată prin tulburări neurologice, scădere statură-ponderală și alterări ale firului de păr) și boala Wilson (degenerescență hepatolenticulară; este o afecțiune ereditară cu transmitere autosomală recesivă, caracterizată prin acumulare de cupru în ficat și nucleul lenticular).

Fluorul Fluorul este un oligoelement esențial care intră în structura cristalelor de hidroxiapatită din oase și dinți:

Necesar, apart, eliminare: cantitatea totală de fluor din organismul uman adult este estimată la 3 g. Necesarul nutrițional este de 0,5 mg/zi, realizat prin aport alimentar, dar și prin adaosuri profilactice sub formă de aplicări locale sau de administrare orală (comprimate standardizate, apă sau făină fluorizată). Principalele surse alimentare cu fluor sunt apa, ceaiul, cerealele (grâu, orez), pâinea de secară, gălbenușurile de ou, ceapa, usturoiul, varza și carnea crudă, animalele marine, spanacul și tomatele. Fluorul se elimină prin urină, iar materiile fecale permit eliminarea fluorului neabsorbit.

Implicații fiziologice: fluorul contribuie la dezvoltarea scheletului, conferind soliditate osului. Fixarea fluorului la cristalele de hidroxiapatită determină protecția țesutului osos față de acțiunea osteoclastelor și stimulează acțiunea osteoblastelor. La nivelul dinților, fluorul are atât o acțiune de prevenire a cariei dentare, cât și o intervenție în acțiunea reparatorie a cariei deja constituite în asociere cu calciul și fosforul.

Tulburări ale metabolismului fluorului: carența de fluor se manifestă prin deteriorarea țesutului osos și a smalțului dentar. Aportul excesiv de fluor are efecte toxice a căror intensitate este dependentă de doză și de timpul de expunere. Intoxicația cu fluor poate fi acută sau cronică. În intoxicația acută care apare de regulă accidentală, se manifestă prin perturbarea generării și transmiterii influxului nervos, cu efecte letale. Intoxicația cronică se manifestă prin tulburări la nivelul dinților (dinți friabili, edentație totală) sau a scheletului (osteoscleroză, osteofluoroză anchilozantă).

Seleniul Este un oligoelement esențial, prezent în organismul adult în cantitate de 6–13 mg (concentrația serică variază în jurul valorilor de 6–105 μg/l), din care 1% se găsește ca și constituent al glutatonei peroxidazei.

Necesar, apart, eliminare: necesarul zilnic de seleniu variază între 0,07–0,2 mg și este asigurat prin alimentație. Este prezent în alimente sub formă de compuși organici (seleno-metionină, seleno-cisteină și seleno-cisteină). Surse alimentare bogate în seleniu pot fi considerate carnea și peștele, iar vegetalele (cu excepția usturoiului, cepei și ciupercilor) sunt practic lipsite de seleniu. Pâinea fabricată din făină de cereale și drojdia de bere sunt de asemenea o sursă importantă de seleniu. Eliminarea seleniului se face prin materii fecale și urină sub formă de trimetil-seleniu, dar și prin transpirație și expirație sub formă de dimetil-seleniu.

Implicații fiziologice: seleniul este unul din componenții principali ai sistemelor de apărare împotriva acțiunii nocive a radicalilor liberi, alături de mangan, cupru, zinc și fier. El are o acțiune sinergică cu vitamina C și vitamina E. Acțiunea antioxidantă a seleniului provine din faptul că el este constituentul fundamental al glutatonei peroxidazei. În afara acțiunii sale antioxidante și, implicit, protectoare împotriva îmbătrânirii, seleniului i se mai atribuie și alte numeroase roluri: acțiune protectoare față de metalele grele și față de dezvoltarea unor afecțiuni, cum ar fi hipertensiunea arterială, artrita, scleroza în plăci și procesele neoplazice cu localizare la nivelul sânelui, ficatului, pielii, tractului genito-urinar și gastro-intestinal. Are, de asemenea, acțiune hepatoprotectoare, imunomodulatoare (stimulează proliferarea limfocitelor) și antiagregantă plachetară. Este implicat în sinteza de prostaglandine și leucotriene și în activarea citocromului P₄₅₀.

Tulburări ale metabolismului seleniului: la om, stările carentiale se pot manifesta sub diverse forme. În afară de maladia Keshan (insuficiență cardiacă cu hipertrofie miocardică), se mai descriu afecțiuni ischemice cardiace, distrofie a mușchilor scheletici asociată cu fragilitatea pielii și fanerelor și boala Kashin-Bek (afecțiune osteo-articulară manifestată printr-o necroză selectivă a cartilajelor de creștere).

Siliciul Este un oligoelement esențial, prezent în organismul uman adult în cantitate totală de 3,5 g (concentrație serică 0,5 μg/l).

Necesar, apart, eliminare: necesarul zilnic este de aproximativ 10–20 mg/zi, acoperit de cantitatea prezentă în apă, în coaja fructelor și legumelor verzi. Alimentația care include pâine albă, zaharuri rafinate, precum și fructe și legume fără coajă este considerată săracă în siliciu.

Implicații fiziologice: siliciul este necesar sintezei de collagen și de glucosaminoglicani din cartilajele articulare și asigură elasticitatea, rezistența și permeabilitatea fibrelor elastice, mai ales la nivel vascular. În afară de implicarea în stabilitatea țesutului conjunctiv de susținere și a scheletului, prezența acestui element este legată de numeroase efecte protective.

Tulburări ale metabolismului siliciului: modificări ale conținutului în siliciu prin exces (inhalația prafului de silice) sau prin carență (alimentație săracă în siliciu) determină o patologie complexă. La fel de important ca homeostazia siliciului este raportul acestui element cu alte minerale, în special cu calciul. Modificarea echilibrului siliciu – calciu este prezent în afecțiuni reumatismale și contribuie la procesul de îmbătrânire.

Iodul Este un oligoelement esențial, a cărui prezență este indispensabilă pentru formarea hormonilor tiroidieni.

Necesar, apart, eliminare: în organismul uman se găsesc 10–20 mg de iod. Sursa de iod pentru organism este alimentară. Necesarul zilnic este în medie de 0,1–0,2 mg și este acoperit printr-o dietă care conține fie alimente bogate în iod (lapte, ouă, alimente de origine marină, sare de mare), fie adaosuri profilactice (făină sau sare îmbogățită cu iod). Unele vegetale (varză, rutabagu – o specie de varză cu rădăcină, tubercul și maniocol) conțin o substanță care inhibă formarea hormonilor tiroidieni și cresc astfel efectele unei eventuale carențe de iod.

Iodul se elimină prin urină și materii fecale.

Implicații fiziologice: iodul intervine în sinteza hormonilor tiroidieni.

Tulburări ale metabolismului iodului: carența de iod provoacă alterarea funcției tiroidiene, manifestată în special prin tulburări în dezvoltarea fizică și mentală. Semnele carenței de iod apar numai dacă aportul zilnic este mai mic decât 30–40 μg un timp îndelungat.

Litiul Este un oligoelement esențial. Litiul este folosit în tratamentul multor afecțiuni psihiatrice (psihoza maniaco-depresivă, sindroame anxio-depresive reacționale), în dificultăți de adaptare (de exemplu la copii hiperemotivi și cu instabilitate psihică) și în tulburări de afectivitate și comportament de diferite cauze.

Manganul Este un metal cu răspândire largă în natură în special sub formă de oxizi.

Necesar, apart, eliminare: organismul uman adult conține între 12–20 mg de mangan (concentrație serică sub 1 μg/l). Manganul este prezent în numeroase alimente (cereale integrale, legume, gălbenuș de ou, nuci) și în special în ceai. Dieta echilibrată asigură în general un aport adecvat de mangan și de aceea stările carentiale la om sunt foarte rare. Necesarul zilnic variază între 2,5–5 mg.

Implicații fiziologice: manganul are acțiune detoxifiantă, limitează acumularea grăsimilor, are acțiune hipoglicemiantă și este esențial pentru troficitatea cartilajelor și țesutului osos. De asemenea, este cofactor pentru numeroase enzime: piruvat carboxilaza, SOD, arginaza, fosfataza alcalină, glicozil transferaza și adenilat ciclaza. Manganul este un oligoelement reglator indicat în special în manifestările de tip alergic.

Tulburări ale metabolismului manganului: caracteristică pentru carența de mangan este maladia articulară Mślémi, care se manifestă prin displazia epifizelor și tulburări ale procesului de mineralizare a oaselor. Aportul alimentar excesiv de mangan produce tulburări în absorbția fierului.

Molibdenul Este un oligoelement esențial care se găsește în cantitate redusă în organism (10 mg).

Necesar, apart, eliminare: concentrația serică a molibdenului este extrem de mică (0,5 μg/l). O rație alimentară bazată pe alimente rafinate este săracă în molibden, iar un aport excesiv de sulf reduce cantitatea de molibden din organism. Alimentația parenterală prelungită reduce aportul de molibden, ceea ce are drept consecință o intoleranță la aminoacizii sulfurați.

Implicații fiziologice: molibdenul intră în constituția unor enzime, în special hepatice: xantin oxidaza, aldehyd oxidaza, sulfii oxidaza și nitrat reductaza. Prezența molibdenului este esențială pentru transformarea bazelor purinice în acid uric. Favorizează absorbția intestinală a fierului, căruia îi facilitează transformarea în forma feroasă. Molibdenul inhibă metabolismul cuprului și siliciului și favorizează retenția de fluor în organism. Prezența sa în apa potabilă, împreună cu fluorul și stronțul este importantă pentru prevenirea cariei dentare.

Nichelul Se găsește în organismul uman adult în cantități mici.

Necesar, aport, eliminare: cantitatea totală de nichel este de 10 mg, iar concentrația serică de 5 $\mu\text{g/l}$. Necesarul zilnic (0,035 mg) este asigurat de alimente bogate în nichel: morcovi, varză, fasole, roșii, spanac, ceapă și struguri.

Implicații fiziologice: nichelul potențează activitatea insulinei. În asociere cu cobaltul și cuprul favorizează absorbția intestinală a fierului și formarea hemului. Nichelul este necesar în metabolismul metioninei iar între acest element și vitamina B_{12} are loc o interrelație, în sensul că nichelul este necesar pentru metabolismul vitaminei B_{12} , dar, în același timp, vitamina B_{12} este necesară pentru ca nichelul să-și exercite acțiunile. Nichelul are un posibil efect hipotensor, prin faptul că este un antagonist al efectelor adrenalinei.

Tulburări ale metabolismului nichelului: deficitul de nichel poate produce blocarea proceselor de gluconeogenază și de absorbție a fierului.

Staniu. **Necesar, aport, eliminare:** concentrația serică a staniului este de 30–100 $\mu\text{g/l}$. Cantitatea totală de staniu în organism este foarte mică.

Implicații fiziologice ale staniului: staniu este implicat în mecanismele de apărare; facilitează absorbția și utilizarea tisulară a vitaminei B_{12} și intervine în reacțiile oxido-reducătoare, catalizând transferul de electroni. Contribuie la stabilizarea structurii terțiare a acizilor nucleici și a proteinelor și potențează efectele fluorului în prevenirea cariei dentare (fluorura de staniu este mai eficientă în aplicații locale față de alte fluoruri).

Tulburări ale metabolismului staniului: carența de staniu, descrisă experimental la șobolani, produce alopecie și întârzieri de creștere, efectele fiind reversibile prin administrare de staniu sau de vitamina B_{12} .

Vanadiu. **Necesar, aport, eliminare:** cantitatea totală de vanadiu din organismul adult este de 10–20 mg. Necesarul de vanadiu este de 1–2 mg/zi și este procurat dintr-o dietă echilibrată. Din cantitatea totală de vanadiu ingerată din alimente, cea mai mare parte (90%) este eliminată prin urină. Concentrația serică este de 0,02–1 g/l.

Implicații fiziologice: în organism, vanadiul intervine cu rol modulator sau catalitic într-un număr relativ mare de procese. Astfel, vanadiul inhibă sinteza de colesterol, are efecte reglatoare asupra pompei de sodiu și calciu și intervine în modularea activității musculare, renale și cerebrale. Fiind prezent la nivelul situsului activ al flavin dehidrogenazei, vanadiul catalizează reacțiile de oxidare. Vanadiului i se atribuie și o acțiune bipolicemiantă.

Tulburări ale metabolismului vanadiului: carența de vanadiu este puțin probabilă la om. Se descrie, totuși, o incidență crescută a aterosclerozei în regiunile în care solul conține puțin vanadiu. Concentrații crescute de vanadiu se întâlnesc în psihoza maniaco-depresivă și în intoxicații, cel mai adesea de natură profesională; vanadiul este folosit în siderurgie și în industria cernelurilor, coloranților și pesticidelor.

Zinc. Organismul uman adult conține o cantitate de aproximativ 1–3 g, ceea ce îl poate încadra în grupa oligoelementelor esențiale „abundente”.

Necesar, aport, eliminare: necesarul zilnic de zinc (7,5–20 mg) este asigurat printr-o dietă care conține alimente bogate în zinc: ficat, carne, gălbenușul de ou, cereale, legume proaspete. În mod special, produsele marine conțin o mare cantitate de zinc. Eliminările de zinc din organism se fac, în proporții diferite, prin materii fecale, urină și sudoare. Prin materii fecale se elimină zilnic aproximativ 10 mg de zinc, care cuprinde zincul ingerat, fracțiunea din secrețiile digestive (în special biliare), dar și o cotă de zinc care se secretă la nivelul intestinului, independent de secreția biliară. Eliminarea zincului prin urină este relativ constantă (în condiții normale 0,5 mg/24 ore), nefiind influențată de creșterea aportului. Cantitatea de zinc eliminată prin sudoare este foarte redusă, dar poate crește în condițiile unor transpirații abundente.

Implicații fiziologice: zincul este implicat în procesele de creștere, în funcția respiratorie, de reproducere, în sinteza acizilor nucleici. Este constituent sau cofactor a unui mare număr de enzime, intervenind în toate metabolismele. De asemenea, este implicat în reproducere și osteogeneză. Influențează secreția de hormoni gonadotropi. Zincul poate fi considerat un „oligoelement al integrității cutanate”, participând la sinteza collagenului (cele mai vechi indicații terapeutice ale zincului priveau tratamentul plăgilor și al arsurilor). Zincul stimulează activitatea fibroblastilor, ceea ce îi justifică utilizarea și în tratamentul vergeturilor.

Prezența zincului este necesară funcției normale a pancreasului endocrin, deoarece, în afară de faptul că intră în structura insulinei, stocarea hormonului presupune formarea unor complexe cu zinc. Zincul are și rol antioxidant, dovedit prin constatarea că reducerea conținutului în zinc a membranelor determină o creștere a riscului oxidativ. Zincul are acțiuni complementară și sinergică cu vitaminele A, B_6 și cu manganul și, recent, s-a constatat implicarea sa în apoptoză.

Tulburări ale metabolismului zincului: deficitul de zinc se însoțește de atrofia timusului și a țesuturilor limfoide, scăderea numărului limfocitelor T și reducerea ratei de formare a imunoglobulinelor. Modelul de referință pentru carența de zinc îl reprezintă acrodermita enterohepatică, o afecțiune genetică rară, caracterizată prin leziuni cutanate și mucoase, tulburări de tranzit intestinal (diaree), incidență crescută a infecțiilor, aurofie a timusului, reducerea ratei de proliferare a limfocitelor, a chimiotaxiei și fagocitozei. La copil, deficitul organismului în zinc se manifestă prin întârzieri în creștere, hipogonadism și predispoziție crescută la infecții, iar la femeile gravide crește riscul de avort și de apariție a malformațiilor fetale.

Intoxicația cu zinc datorită acumulării sale în organism are o simptomatologie în special digestivă (tulburări ale secreției salivare, vomă, dureri gastrice, modificarea senzației gustative, caracterizată prin perceperea inițială a gustului dulceag, urmată de senzația de gust amar).

Fierul. Cantitatea totală de fier din organismul uman adult este de 4–5 g (la bărbați 50 mg/kg corp, iar la femei 35 mg/kg corp). Concentrația de fier din plasmă (sideremia) este 50–150 $\mu\text{g/dl}$.

Necesar, aport, eliminare: necesarul zilnic de fier la organismul uman este variabil, în funcție de vârstă, sex și de pierderile temporare sau permanente (la bărbat: 10 mg/zi, la femeie în perioada fertilă: 20 mg/zi, în sarcină: 30–40 mg/zi, la copil: 4–10 mg/zi, cu un necesar mai crescut în perioada pubertară, mai ales la fete: 10–20 mg/zi).

La adult, necesarul de fier este preluat prin alimentație. Alimente bogate în fier sunt carnea (conține fier hemic), ouăle, legumele verzi (conțin fier non-hemic). Eliminarea fierului se realizează prin materii fecale (cantitatea de fier eliminată prin fecale este de 100 μg și este condiționată de numărul de enterocite descumate); prin bilă se elimină o cantitate de până la 250 μg de fier provenit din degradarea moleculelor de hemoglobină la nivelul ficatului și prin piele (transpirație, descumare epitelială, unghii, păr). De asemenea, se pierde fier în cursul menstruației și gravidității. Pierderile de fier prin menstruație sunt în jur de 1,4–2,3 mg. În timpul gravidității, femeia pierde 500–600 mg de fier. La naștere se mai pierde 500 ml de sânge, care antrenează o altă pierdere de fier.

Implicații fiziologice:

– Utilizarea în cursul eritropoiezei. Procesul parcurge mai multe etape: separarea fierului de transferina plasmatică; pătrunderea fierului în stroma reticulocitelor și fixarea în acest loc a unei proteine neglobinice; eliberarea fierului din această legătură și trecerea lui în citoplasmă precum și incorporarea fierului în protoporfirină, în vederea formării hemului.

– Utilizarea în alte țesuturi. Fierul mai este utilizat pentru sinteza proteinelor și enzimelor ferice, ca mioglobina, citocromii, catalaza și peroxidaza. Placenta, intestinul și mușchiul scheletic sunt țesuturi în care utilizarea fierului este maximă.

Tulburări ale metabolismului fierului: hiposideremia determină apariția anemiei feriprive. Această afecțiune se instalează mai ales la femeile însărcinate și la fete, odată cu declanșarea menstruației.

b) **Oligoelemente esențiale.** În organismul uman există un număr de elemente chimice, în cantități foarte reduse și care, deși nu sunt incluse în grupa oligoelementelor esențiale, au totuși un rol important, mai ales în oligoterapia catalitică.

Aluminiu. În organismul uman cantitatea de aluminiu este foarte redusă (concentrația serică medie este sub 10 $\mu\text{g/l}$). Aluminiul este considerat ca un element care favorizează dezvoltarea normală, fiind implicat în procesele de recuperare a facultăților cognitive (la copil) și în procesul de adaptare la stres de la adult. Manifestările carenței de aluminiu au fost descrise numai experimental (la porumbel) de către Randoiu, sub forma unor tulburări similare cu cele provocate de lipsa vitaminei B_1 .

Unii compuși cu aluminiu sunt folosiți pentru proprietățile lor astringente și antiacide. Împreună cu alte oligoelemente, aluminiul are indicații la copii hiporeactivi, cu dezvoltare insuficientă sau întârziată a funcțiilor cognitive (Cu – Au – Ag); în asociere cu Mg sau cu Mn este utilizat în stări de hiperreactivitate (agitatie,

adormire cu dificultate), dificultate de concentrare și de memorizare prin surmenaj intelectual și în insomnii consecutive stărilor de stres.

Argintul. Este un oligoelement prezent în cantități foarte mici în organismul uman (mai puțin de 1 mg/l), datorită ingerării zilnice de pe vase argintate (tacâmuri) utilizate în bucătărie, prin inhalare de pulberi sau prin contact cutanat la cei care îl manipulează (bijutieri, muncitori din sectorul extractiv, fotografi).

În cantități mici inhibă creșterea bacteriilor și a mușcăiunilor. Are proprietăți bactericide ale apei puse în contact cu acest metal. A fost pus în evidență în unele alge și în drojdia de bere. Toxicitatea compușilor care conțin argint imbracă aspect de boală profesională (arginism) și mai rar de intoxicație medicamentoasă.

Bismutul. Este un oligoelement cu acțiune antiinflamatorie și antiinfecțioasă. Sărurile de bismut au fost utilizate în afecțiuni digestive și cutanate, iar unii derivați de bismut au fost folosiți în tratamentul sifilisului până când au fost înlocuiți cu tratamentul cu antibiotice.

Aurul. Este un oligoelement prezent în organismul uman în cantitate redusă (concentrația sa serică este de 80 mg/l). Utilizarea aurului în tratamentul tuberculozei a fost abandonată, dar sărurile sale sunt utilizate în tratamentul afecțiunilor reumatismale și pentru creșterea potențialului de apărare în cursul unor infecții.

1.2. COMBINAȚIILE ORGANICE ȘI ANORGANICE DIN MATERIA VIE

Elementele chimice mai sus enumerate se combină complex, formând substanțele organice și anorganice caracteristice materiei vii. Organismul uman adult este format din apă (60%), proteine (15%), lipide (14%), glucide (15%) și săruri minerale (5%). Proporția acestor substanțe diferă în funcție de caracteristicile morfo-funcționale ale zonei luate în considerație (tabelul 1.III).

TABELUL 1.III

Compoziția chimică procentuală în diferite organe și țesuturi

Substanța chimică	Țesut, organ (%)					
	Sânge	Ficat	Mușchi striat	Creier	Piele	Os
Apă	79	60-80	72-78	78-85	66-70	20-25
Proteine	19	15	18-20	8	25	30
Glucide	0,1	1-15	0,6	0,1	0,01	0,01
Lipide	1	3-20	3	12-15	7	0,01
Săruri minerale	0,9	0,01	1	1	0,6	45

1.2.1. SUBSTANȚELE ORGANICE

Proteinele. Reprezentând din punct de vedere biologic principalii constituenți ai materiei vii, proteinele sunt formate din aminoacizi cuplați în structuri ce pot ajunge la grade neobișnuite de complexitate.

Structura proteinelor se caracterizează printr-o riguroasă specificitate. Aceasta rezultă din secvența aminoacidică și configurația spațială a moleculei.

Clasificare. În afara clasificării chimice uzuale (tabelul 1.IV), din punct de vedere funcțional proteinele se grupează în două categorii: proteine structurale și funcționale.

TABELUL 1.IV

Clasificarea substanțelor de natură protidică

- I. Aminoacizi: - esențiali
- neesențiali
- II. Peptide:
 - A. Oligopeptide:
 - dipeptide (carnozina, anserina)
 - tripeptide (glutation)
 - B. Polipeptide:
 - hormoni (ADH, ACTH, STH, insulina etc.)
 - peptide biologic active (angiotensina, plasmakimine)
- III. Protide:
 - A. Holoproteine (proteine):
 - protamine
 - histone
 - albumine
 - globuline
 - B. Heteroproteine (proteide):
 - scleroproteine (keratina, elastina, gelatina)
 - fosfoproteine (caseina)
 - glicoproteine (eritropoietina)
 - lipoproteine
 - cromoproteine (hemoglobina, mioglobina etc.)
 - nucleoproteine

Proteinele structurale, în majoritatea lor fibrilare, formează structurile celulare de rezistență, tensive și elastice.

Proteinele funcționale sintetizate în celule pot avea o prezență temporară la acest nivel, fiind eliminate în mediul extracelular, unde circulă exercitându-și funcția la nivelul structurilor țintă (hormoni). Proteinele funcționale permanente rămân în celula de origine, unde îndeplinesc numeroase roluri. Din această categorie fac parte, de exemplu, proteinele-enzime cu rol biocatalitic sau nucleoproteinele din constituția genomului, ce controlează sintezele și funcțiile celulare, precum și transmiterea caracterelor ereditare. În general, proteinele funcționale sunt de tip globular.

Caracteristici fizico-chimice. Într-o succintă enumerare, proprietățile mai importante ale moleculelor proteice sunt următoarele:

- **greutatea moleculară mare,** atingând valori de ordinul a 10^5 unități Svedberg, le împiedică să traverseze pasiv membranele celulare și joacă un rol deosebit în schimburile hidroelectrolitice dintre diversele compartimente ale organismului;

- **caracterul amfoter,** datorat prezenței simultane a grupărilor aminice și carboxilice, le face să se comporte ca acizi în medii alcaline și ca baze în medii acide. Acest fapt explică participarea proteinelor ca sisteme tampon în echilibrul acido-bazic. Echilibrul dintre cele două stări se realizează la un pH al mediului caracteristic fiecărei proteine, cunoscut sub denumirea de *punct izoelectric*. La acest pH, majoritatea proprietăților (solubilitate, conductibilitate electronică, vâscozitate, presiune osmotică, reactivitate chimică etc.) atinge valori minime. Existența grupărilor polare (cu sarcini electrice) determină și proprietatea *migrării în câmp electric* a proteinelor, utilizată în metode de separare, cum ar fi electroforeza;

- **solubilitatea** diferă în funcție de tipul de proteină și de solvent. Albuminele sunt hidrosolubile, având rol în transportul altor substanțe și menținerea presiunii osmotice, în timp ce globulinele sunt solubile doar în soluții alcaline. Proteinele fibrilare sunt insolubile;

- **capacitatea de hidratare** se datorează interacțiunii grupărilor polare cu dipolii apei din mediu. Hidrofilia, alături de greutatea moleculară mare și de solubilitate, determină *presiunea coloidosmotică* a compartimentului lichidian în care se află proteine. Această presiune reprezintă un factor important în direcționarea fluxurilor de apă dintre diverse compartimente ale mediului intern. Greutatea moleculară mare a proteinelor determină și *vâscozitatea* soluției în care se găsesc, condiționând hidro- și mai ales hemodinamica circulatorie;

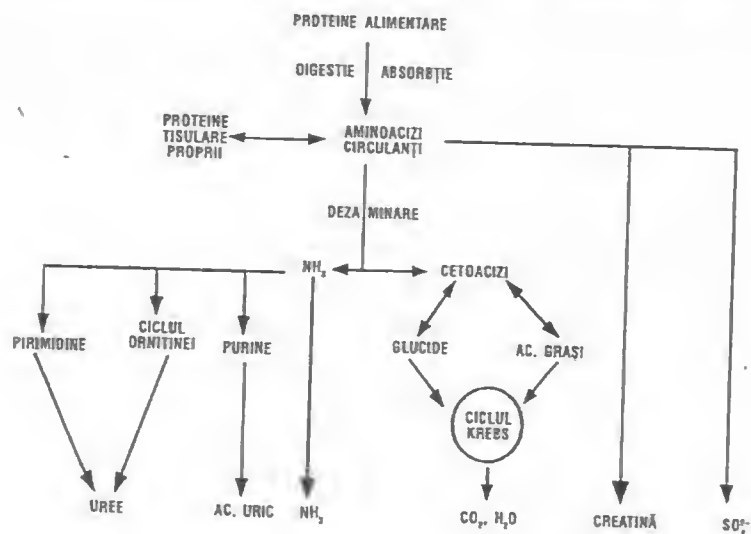


Fig. 1.4. Reprezentare schematică a metabolismului proteinelor și aminoacizilor (după Toporek, 1968).

TABELUL 1.V

Clasificarea substanțelor de natură glucidică

I. Oze:

- A. Trioze: - aldehida glicerică
- dihidroxiacetona
- B. Pentoză: - riboză
- deoxiriboză
- C. Hexoză: - glucoză
- galactoză
- fructoză
- D. Derivați: - ozamini
- acizi uronici

II. Ozide

- A. Holozide: - oligozide: dizaharide (maltoză, lactoză, zaharoză)
- poliozide: amidon, celuloză, glicogen
- B. Heterozide: - poliuronide
- polihexozamine
- acid hialuronic (mucitinic)
- acid mucotinsulfuric
- acid condroitinsulfuric

Principalul compus glucidic folosit de organism este glucoza. Utilizările glucozei în organism sunt multiple (fig. 1.5). O parte din glucoza neutilizată în alte căi metabolice este convertită în glicogen, stocat

mai ales în ficat și mușchi. Majoritatea glucozei este oxidată în vederea obținerii energiei necesare funcțiilor vitale.

Acest proces se desfășoară în două etape succesive: *etapa anaerobă* (Embden-Mayerhof), în care se formează acid piruvic sau lactic, și *etapa aerobă* (ciclul Krebs al acizilor tricarboxilici), în care se ajunge la transformarea finală în CO_2 și H_2O , cu eliberarea unor mari cantități de energie stocată în ATP. Glucoza poate fi convertită în alți metaboliți (acizi grași și glicerol, aminoacizi și alte hidrocarbonate - pentoze, galactoză). Glicemia, concentrația glucozei circulante, este menținută în limite normale (0,8-1,2 g/l) prin intervenția unor mecanisme homeostazice de control neuro-hormonal, care asigură echilibrul dintre utilizarea glucozei circulante și eliberarea sa din depozite (fig. 1.6).

Lipidele. Îndeplinind importante roluri structurale și funcționale, lipidele se găsesc în organism sub forma unor combinații chimice simple sau complexe (tabelul 1.VI).

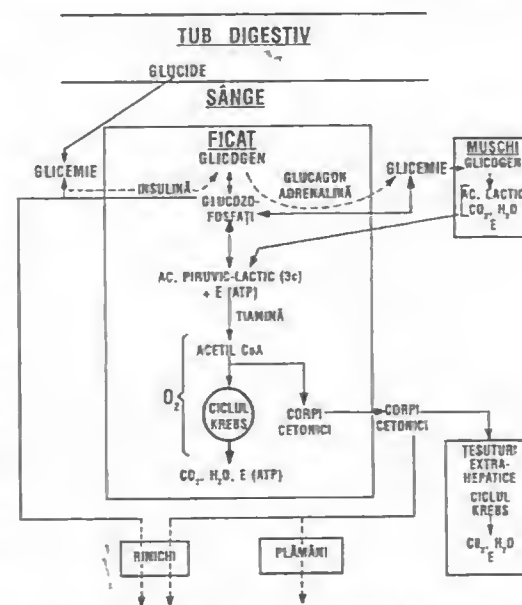


Fig. 1.5. Distribuția și metabolismul glucozei în organism.

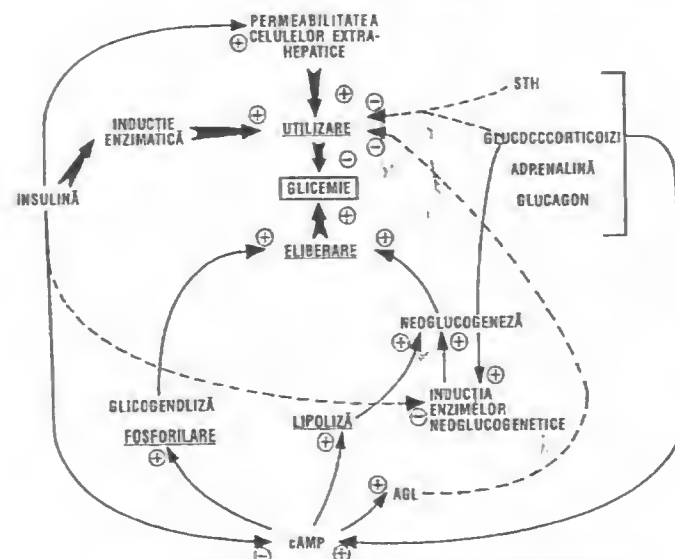


Fig. 1.6. Câteva dintre mecanismele hormonale ale reglării glicemiei.

Caracteristicile electrice ale apei pure (rezistență electrică specifică mare) o fac să se comporte ca un dielectric perfect. În schimb, soluțiile apoase ce formează organismele vii sunt foarte bune conducătoare de electricitate.

Proprietățile termice ale apei din organism explică rolul pe care apa îl joacă în procesele termoreglării. Având o căldură specifică mare (1 kcal/g), apa înmagazinează mari cantități de energie termică, pe care o transportă de la zonele de producere spre zonele de eliminare. Conductibilitatea calorică a apei fiind de asemenea ridicată, devine posibilă uniformizarea temperaturii organismului. Dacă la acestea se adaugă și capacitatea de a ceda prin evaporare (transpirație) mari cantități de energie termică (căldură latentă: 536 kcal/l), devine lesne de înțeles de ce apa reprezintă principalul transportor și disipator al căldurii produse de organism, împiedicând apariția hipertermiei locale și generale.

Sărurile minerale. O importanță deosebită pentru funcționalitatea organismului o reprezintă forma electrolică, disociată, a acestor săruri solvite în mediile intra- și extracelulare. Repartiția electroliților diferă de la un compartiment la altul. Astfel, în mediul extracelular predomină, dintre cationi, sodiul (Na^+), iar, dintre anioni, Cl^- și CO_3H^- . Intracelular predomină K^+ , iar, dintre anioni, PO_4^- , alături de anionii organici cu moleculă mare. Rolurile acestor electroliți, parțial discutate mai sus (vezi elementele chimice), vor fi reluate și aprofundate în alte capitole.

2. ORGANIZAREA STRUCTURAL-FUNCȚIONALĂ A CELULEI

S-a descris existența a două tipuri (arhetipuri) de celule: *procariote* (prezente la bacterii și unele alge; nu au genomul separat de citoplasmă într-un nucleu definit) și *eucariote* (prezente la protozoare și toate metazoarele, inclusiv omul; au genomul izolat de citoplasmă într-un nucleu clar definit). În cele ce urmează se vor descrie caracteristicile structurale ale celulei eucariote.

Dimensiunile reduse ale celulelor eucariote (în general sub 100 μm) au necesitat introducerea și dezvoltarea unor tehnici de studiu cu capacități de rezoluție din ce în ce mai mari, începând cu microscopia optică și terminând cu cele mai actuale variante de microscopie electronică, la care s-au adăugat metode de analiză spectrală (rezonanța electronică de spin – RES; rezonanța magnetică nucleară – RMN), metode izotopice, microelectro-fiziologice, tehnici de separație fizico-chimice etc.

Fiecare celulă eucariotă are o membrană celulară (plasmalemă), care o separă de mediul extracelular, și un sistem de membrane intracelulare, care depășește de cca 10–20 de ori plasmalema, atât în ceea ce privește masa, cât și suprafața. Membranele intracelulare sunt de cel puțin 10 tipuri diferite structural, biochimic și funcțional, fiecare tip fiind organizat ca un compartiment închis. Prin urmare, celula reprezintă „un sistem înalt compartimentat, în care o serie de compartimente mici (diferite prin oatura membranei și conținut) sunt incluse într-un compartiment relativ mare, comun și continuu, numit matrice citoplasmatică” (fig. 2.1).

În afară de plasmalemă și matricea citoplasmatică, celula este constituită dintr-o serie de compartimente subcelulare, denumite și organele celulare, destinate fiecare îndeplinirii unei funcții specializate. La rândul lor, organele celulare pot fi de două tipuri. Unele sunt ansambluri macromoleculare (proteine sau nucleoproteine), localizate de obicei în matricea citoplasmatică (mai rar în alte compartimente). Funcționarea lor depinde direct de gradientele chimice și electro-chimice create de plasmalemă. Ele sunt reprezentate de ribozomi și aparatul locomotor (citoschelet, sisteme de microtubuli și filamente) și nu pot fi diferențiate decât arbitrar de sistemele cu grad mai redus de complexitate (sisteme multienzimatice, filamente și particule). A doua categorie de organele este reprezentată de compartimente celulare delimitate de o membrană și conținând o matrice proprie. Funcția lor depinde de gradientele locale create de sistemul de citomembrane intracelulare. Din această categorie fac parte mitocondriile, lizozomii, aparatul Golgi, reticulul endoplasmatic etc.

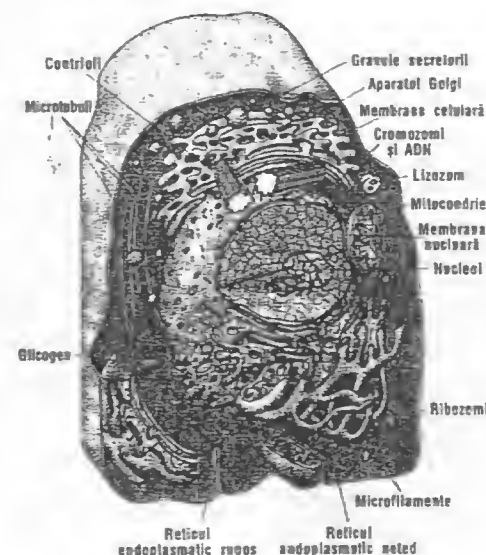


Fig. 2.1. Reprezentare schematică a unei celule.

2.1. NUCLEUL

Localizat de obicei în centrul celulei, nucleul are o formă sferică sau ovoidală, cu un diametru de 3–5 μm și un volum mediu de cca 50 μm^3 (aproximativ 10% din volumul celulei). În funcție de tipul și starea celulei, se descriu numeroase variații de formă și dimensiune. În celulele aflate în interfază, nucleul este un compartiment celular distinct, separat de citoplasmă printr-o membrană nucleară. Aceasta constă din două foițe (internă și externă) organizate într-o cisternă perinucleară ce face parte din reticulul endoplasmatic (fig. 2.2)

În zonele de contiguitate dintre cisterne se află fenestrații (pori nucleari), cu un diametru de cca 80 nm și prevăzute cu o structură numită complex de por. Pori sunt probabil zonele de schimb macromolecular nucleu-citoplasmatic. Este posibilă și realizarea unor schimburi între nucleu și cisternele reticulului endoplasmatic. Foița externă a membranei nucleare are o structură identică cu cea a reticulului endoplasmatic cu care se continuă. Uneori prezintă ribozomi. Foița internă este dispusă pe o căptușeală laminară (lamina fibroasă), pe care sunt fixate complexele de por, și interacționează cu cromatina nucleară.

Nucleul conține genomul celulei, care constă dintr-un număr definit de molecule lungi de ADN, având fiecare structura în dublu helix, caracteristică. Lungimea lor totală atinge în celula umană valoarea de cca 1,60 m, ele conținând un volum de informație de aproximativ 9×10^{11} biți.

Nucleul mai conține echipamentul necesar separației genomului, replicării sale în vederea diviziunii, transcripției sale pe ARN și prelucrării transcriptului original în formele de ARN mesager, de transport și ribozomal.

De asemenea, în nucleu are loc asamblarea subunităților ribozomale. Componenta principală a nucleoplasmei este cromatina (o nucleoproteină), organizată sub formă de fibrile. Fiecare fibrilă constă dintr-o panglică ce conectează a serie de granule cu diametrul de cca 10 nm. Fiecare granulă este un octamer conținând 4 proteine bazice (histone), iar panglica asociată este un segment conținând 200 de perechi de baze ale unei molecule foarte lungi de ADN în dublu helix. Molecula de ADN înfășoară fiecare granulă și se extinde de la o granulă la următoarea, formând o legătură de 4–5 nm. O granulă și una dintre legături formează subunitatea repetitivă a fibrilei de cromatină – nucleozomul. Nucleozomul este considerat subunitate de bază a genomului.

Deși în cele de față nu este posibil să se discute și procesul diviziunii celulare, trebuie totuși menționat că fiecare cromozom conține o singură moleculă de ADN și este format din nucleozomi compactați astfel încât să realizeze o structură de 10^4 ori mai scurtă decât molecula de ADN (fig. 2.3).

Nucleolul. Nucleul interfazăic conține 1–2 corpuculi globulari, numiți nucleoli, al căror număr și dimensiuni sunt direct proporționale cu intensitatea sintezelor proteice în celula implicată. Nucleolii sunt formați dintr-o structură fibrilară și una granulară, separate printr-o complexă arie de contact. La nivelul lor se sintetizează și se cuplează cu proteinele specifice ARN ribozomal ce intră în structura subunităților ribozomale. Particulele ribozomale sunt stocate provizoriu în structura granulară, fiind apoi trecute în citoplasmă prin porii nucleari.

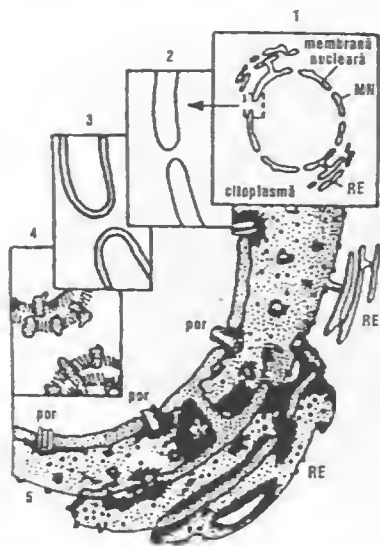
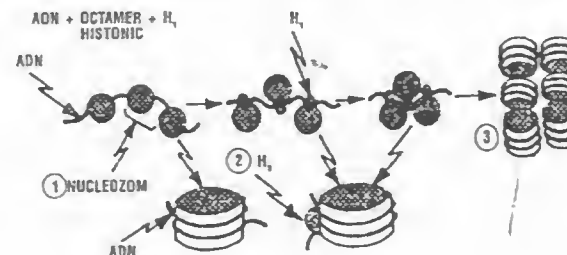


Fig. 2.2. Reprezentare schematică a membranei nucleare (după I. Diclescu și colab., 1983). (1) membrana nucleară și relațiile sale cu reticulul endoplasmatic (RE); (2) și (3) reprezentare schematică a membranei nucleare; (4) structura moleculară schematică a membranei nucleare; (5) reprezentare tridimensională.

Fig. 2.3. Nucleozomii și fibrilele de cromatină. Ilustrare a suprastructurilor (1, 2, 3) ce permit formarea cromozomilor compacți (3).



2.2. MATRICEA CITOPLASMATICĂ

2.2.1. RIBOZOMII

În matricea citoplasmatică, cea mai importantă activitate este sinteza de proteine, realizată cu participarea unui mare număr de molecule și ansambluri macromoleculare, dintre care cele mai reprezentative sunt ribozomii. Aceștia sunt particule de 20–25 nm diametru și au un coeficient de sedimentare de 80 S. Ei sunt formați din două subunități: o subunitate mică (40 S), conținând o moleculă de ARN ribozomal (18 S) și cca 30 de proteine diferite, și o subunitate mare (60 S), conținând 3 molecule de ARNr (23 S, 5,8 S și, respectiv, 5 S), precum și cca 50 de molecule proteice. Cuplarea acestor subunități se realizează în prezența ARNm cu participarea ARNt, care aduce aminoacizii necesari sintezei (fig. 2.4).

Procesul, constând din trei faze succesive (inițiere, elongație, terminare), a fost descris mai sus. De obicei, translația unei molecule de ARNm are loc simultan pe un număr de ribozomi proporțional cu lungimea moleculei. Acest complex se numește polizom (poliribozom) și conține un ribozom pentru fiecare 30 de codoni de pe ARNm (sau pentru fiecare aproximativ 3 300 daltoni Mr ai proteinei produse). Majoritatea ribozomilor se găsește sub formă de polizomi, iar numărul subunităților libere este în general redus. La rândul lor, polizomii pot fi liberi în citoplasmă sau așezați membranelor reticulului endoplasmatic.

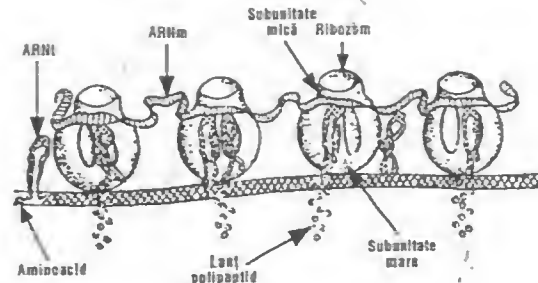


Fig. 2.4. Reprezentare schematică a ribozomilor și desfășurării sintezei de proteine (după Guyton, 1984).

2.2.2. RETICULUL ENDOPLASMATIC

Este compartimentul intracelular cu cea mai complexă geometrie și cea mai mare diversitate funcțională. Constă dintr-o rețea de canale și cisterne, delimitate de membrane individualizate, ce străbat citoplasma de la plasmalema la nucleu (fig. 2.5).

Reticulul endoplasmatic (RE) formează în jurul nucleului cisterna perinucleară sau învelișul nuclear,

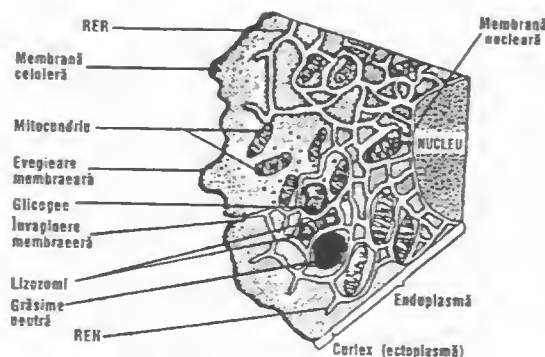


Fig. 2.5. RE și relațiile sale cu alte structuri celulare.

deja discutat, iar la periferie rămâne separat de plasmalema printr-un strat subțire, fibrilar și dens de citoplasmă, numit și exoplasmă (termen desuet).

Rețeaua este delimitată de o membrană fină ce o separă de matricea citoplasmatică. Este formată din tubuli (\varnothing : 50 nm) contorți și anastomozăți și cisterne (saci) turtite (50–70 $\mu\text{m}/10 \mu\text{m}$). Când sunt numeroase, cisternele se dispun în șiruri paralele. Procedurile uzuale de fracționare subcelulară izolează în omogenate așa-zisa fracție microzomală conținând vezicule rezultate din fragmentarea RE. Până în prezent s-au descris câteva domenii ale reticulului endoplasmatic diferențiate funcțional și structurat:

- a) cisterna perinucleară, care înconjură nucleul în interfază și controlează traficul prin porii nucleari;
- b) reticulul endoplasmatic rugos (RER), caracterizat prin atașarea polizomilor la nivelul membranei; conține mai ales cisterne și este implicat în sintezele proteice;
- c) reticulul endoplasmatic neted (REN), format dintr-o rețea fină de tubuli; este uneori asociat cu depozitarea de glicogen și lipide;
- d) elementele de tranziție la limita cu complexul Golgi.

În membranele RE sunt localizate o serie de procese enzimatice esențiale în desfășurarea funcțiilor celulare. La acest nivel s-au descris următoarele categorii mai importante de enzime și procese biochimice:

- *enzime implicate în metabolismul lipidic*: sinteza trigliceridelor, a fosfolipidelor, sfinolipidelor și a colesterolului are loc sub acțiunea enzimelor localizate exclusiv în membrana RE. Producții sunt fie stocați, fie utilizați. S-au descris, de asemenea, enzimele ce modifică lipidele sintetizate (transacilaze, enzime de elongație, de desaturare);
- *enzimele de transport* din categoria fosfatazelor sunt, de asemenea, localizate la acest nivel (Ca^{2+} -ATPaza, nucleozid fosfataze, glucozo-6-fosfataza);
- *oxidazele*, cu funcții multiple, alcătuind un sistem enzimatic conținând NADPH-citocrom P450 reductaza și o familie specifică de citocromi cu rol de detoxifiere a unor compuși străini (morfină, carcinogeni, steroizi);

– *enzime implicate în prelucrarea proteinelor secretoare*: proteinele sintetizate de poliribozomi sunt trecute în cisternele RE cu ajutorul unor enzime de segregare. Acești precursori (preproteine) sunt prelucrați

ulterior prin peptidaze specifice, formare de punți disulfidice, glicozilări parțiale până în stadiul de producție finală livrării aparatului Golgi. În același mod sunt prelucrate până în stadii finale și enzimele destinate echipamentului lizozomal.

2.2.3. APARATUL GOLGI

Aparatul sau complexul Golgi reprezintă un grup de compartimente delimitate de membrane ce se interpun între reticulul endoplasmatic și plasmalema (fig. 2.6). Este format dintr-un pachet (fișic) de 3–10 cisterne aplatizate, cărora i se descrie o față convexă (proximală) în interacțiune cu RE și o față concavă (distală) în relație cu plasmalema. Pe fața proximală (cis) a pachetului de cisterne se află vezicule mici (vezicule Golgi periferice), în timp ce pe fața distală (trans) se găsesc vacuole Golgi mari (de condensare).

Aparatul Golgi interacționează cu RE prin intermediul unor elemente tranziționale, care prezintă polizomi pe fața reticulară și sunt netede, dar cu mici protruții pe fața golgiană. Polarizarea structurală a aparatului Golgi reflectă rolul funcțional îndeplinit de acest sistem celular.

Aparatul Golgi este implicat în transportul activ unidirecțional al proteinelor secretoare, produse în RE, până la nivelul cisternelor și vacuolelor de condensare. Aflate în tranzit, o parte dintre proteinele

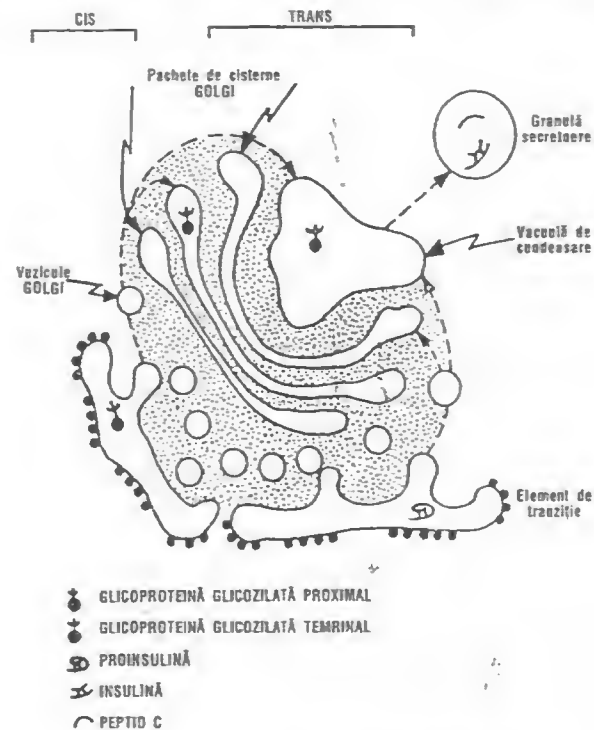


Fig. 2.6. Organizarea aparatului Golgi (după Smith și Thier, 1981).

secretoare suferă modificări chimice posttranslaționale prin proteoliză parțială și glicozilare. În aceste cazuri, proteina precursoră este o proproteină (proinsulină, proalbumină etc.). Proteinele secretoare, prelucrate sau nu, sunt împachetate în formațiuni veziculare (vacuole sau granule de secreție) capabile să interacționeze cu plasmalema în cadrul procesului de exocitoză. În aceste vacuole, produsul de secreție este condensat prin extruzia apei. Se presupune că la nivelul aparatului Golgi are loc și sortarea enzimelor lizozomale și dirijarea lor spre lizozomi.

Exocitaza, sau procesul de expulzare a conținutului veziculelor de secreție, începe prin fuziunea membranei veziculare cu plasmalema. Fuziunea apare fie spontan, fie în prezența unui factor secretagog (Ca^{2+} , neuromediator etc.). Fuziunea este urmată de fuziunea stratului lipidic cu formarea unui orificiu prin care se elimină conținutul vezicular. Procesul necesită Ca^{2+} și energie. Membrana veziculară este de obicei încorporată în plasmalema, din care se refac eventual noi vezicule în vederea reincărcării cu produsul de secreție.

2.2.4. LIZOZOMII

Lizozomii sunt organite saculare ce conțin enzime digestive și funcționează ca un sistem digestiv intracelular. Lizozomii conțin peste 40 de enzime (proteaze, nucleaze, glicozidaze, lipaze, fosfolipaze, sulfataze, fosfataze). Majoritatea sunt hidroxilaze acide. Lizozomii constituie un sistem ce participă la digestia, până la compuși elementari, a substanțelor din afara celulei (heterofagie) sau din interior (autofagie și crinofagie) (fig. 2.7).

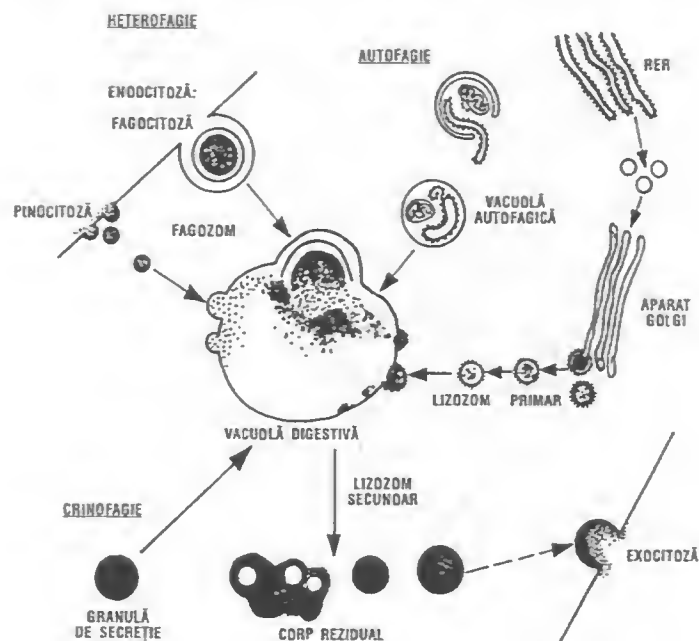


Fig. 2.7. Sistemul lizozomal (reprezentare schematică, modificată după Smith și Thier, 1981).

Heterofagia constă din captarea compușilor extracelulari prin procese de endocitoză. În cursul endocitozei plasmalema se invaginează, generând o veziculă ce conține substanțe din mediu. Vezicula de endocitoză se desprinde de membrană și este trecută în citoplasmă, unde se cuplează cu lizozomii primari, formând vacuole digestive (lizozomi secundari). În cazul particulelor solide de dimensiuni relativ mari (resturi celulare, microorganisme), procesul se numește **fagocitoză** și membrana este strâns aderentă de particula inclusă. Când particulele sunt mici (molecule etc.) și sunt incluse odată cu faza fluidă în vezicule mici, procesul se numește **pinocitoză** de fază fluidă. În alte situații, moleculele sunt captate după fixarea pe plasmalema prin receptori specifici sau absorbție (**endocitoză adsorbtivă** sau receptor-mediată). În unele cazuri, substanța traversează plasmalema și membrana lizozomală și se concentrează direct în lizozomi (coloranți: acridina oranj; medicamente: clorochina; carcinogeni: hidrocarburi clorinate).

Prin fuziunea veziculelor în care se află cu lizozomi, conținutul celular capătă acces la aceștia. Când este vorba de vezicule secretoare, procesul se numește **crinofagie**. În cazul **autofagiei**, porțiuni de citoplasmă și organite celulare sunt incluse într-o cisternă de REN, care ulterior fuzionează cu lizozomul.

Produsul digestiei localizate la nivelul lizozomilor secundari, având dimensiuni moleculare reduse, difuzează în citoplasmă, devenind disponibili pentru procesele de biosinteză. Veziculele golite se reincarcă cu noi compuși și cu enzime digestive. Când compușii nu sunt digestibili, se transformă în corpi reziduali și sunt descărcați la exterior prin exocitoză.

În afara acestei funcții digestive generale, în unele celule lizozomii îndeplinesc și funcții specializate, cum ar fi: **funcția de apărare** (fagocitarea microorganismelor în granulocite și macrofage); **funcția de distrugere** a celulelor îmbătrânite (distrugerea hematiilor de către macrofagele din splină); **secreția unor hormoni** (scindarea hormonilor tiroidieni din stocurile tiroglobulinice); **absorbția proteinelor** (recuperarea proteinelor filtrate de către celulele tubului urinar proximal); **regenerarea bastonașelor retiniene** (discurile de la vârful bastonașelor sunt distruse de lizozomii epitelului pigmentar) etc.

Implicațiile biomedicale ale patologiei lizozomilor sunt astăzi relativ bine cunoscute. Orice factor ce perturbă stabilitatea membranei lizozomale determină distrugeri celulare, local sau la distanță, prin ejectarea enzimelor hidrolitice deosebit de agresive. Absența unor enzime lizozomale determină mari acumulări intracelulare ale substratului corespunzător (de exemplu, boala Pompe, în care se produc mari acumulări de glicogen prin absența alfa-glicozidazei).

În alte situații, acumularea unor produși nedigerabili (acid uric în gută sau siliciu în silicoză) determină distrugerea membranei lizozomale și moartea celulară. În același mod acționează și unele toxine bacteriene virulente.

2.2.5. MITOCONDRIILE

Legăturile fosfat macroergice din ATP reprezintă cea mai comună formă de stocare și eliberare a energiei proceselor celulare. Sistemele intracelulare generatoare de energie sunt în esență producătoare și distribuitoare de ATP. În celulele animale operează în tandem două sisteme generatoare de ATP: **glicoliza**, localizată în citosol, și **fosforilarea oxidativă**, localizată în mitocondrii.

Mitocondriile sunt structuri filamentoase sau granulare, de 0,3–0,5 μm diametru și până la 10 μm lungime. Numărul și forma lor variază continuu. Ocupă aproximativ 5% din volumul celular, dar în țesuturile foarte active pot ocupa 20% (hepatocite) sau chiar 30% (miocard). În principiu, toate mitocondriile au o organizare similară. Prezintă o membrană mitocondrială externă, cu geometrie simplă, și o membrană mitocondrială internă, puternic pliată (fig. 2.8).

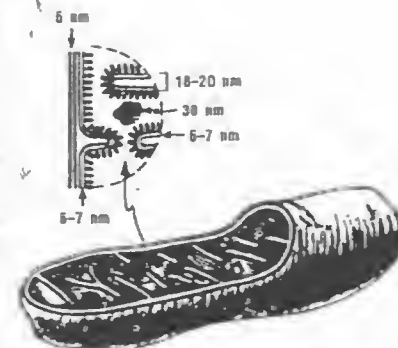


Fig. 2.8. Reprezentare schematică tridimensională a mitocondrii (după Palade și Farquhar, 1981).

La nivelul ecuatorului structurii, fixat pe elementele microtubulare, se află un inel discontinuu, format din mase dense (sateliți centriolari). Pe aceste mase pare să se fixeze sistemul microtubular al celulei. În momentul diviziunii, centriolii se dedublează, migrează la poli opuși ai celulei și formează fusul de diviziune;

– *cilii* și *flagelii* sunt structuri similare ca organizare, având doar dimensiuni evident mai mari în cazul celor doi urmă. Sunt formați din axolemă, o porțiune alungită ce pătrunde la periferia celulei, fiind acoperită de plasmalemă. Axolema este formată din 9 perechi periferice de microtubuli, dispuse în jurul celei de a 10-a perechi centrale. Între dubletele învecinate se formează punți transversale de dineină (proteină cu activitate ATPazică), dispuse periodic în locul structurii. Aceste punți se formează și se desfac ciclic, determinând mișcări de alunecare reciprocă. Axolema este fixată pe un corp bazal, având structura unui centriol.

Dispozitivele contractile: toate celulele conțin, mai mult sau mai puțin, toate proteinele contractile descrise inițial numai în fibrele musculare (actina, miozina, tropomiozina etc.), diferențele constând doar în modul de organizare și cantitățile existente.

În celule s-au descris microfilamente de actină, organizate adesea în fascicule ancorate la periferie. Aceste filamente interacționează cu filamente scurte de miozină și alte proteine contractile, formând unități motorii de forme și dimensiuni variate. Aceste ansambluri contractile sunt adesea tranzitorii (spre deosebire de fibrele musculare), formându-se și dispărând în funcție de necesitățile funcționale de moment.

2.2.8. ORGANITELE CELULARE SPECIFICE

Îndeplinind funcții specializate, unele tipuri de celule conțin organe adaptate realizării acestor funcții. Din această categorie fac parte miofibrilele celulelor musculare, neurofibrilele și corpii Nissl caracteristici neuronilor etc. Aceste structuri vor fi descrise odată cu funcțiile respective.

2.2.9. INCLUZIUNILE CELULARE

Matricea citoplasmatică, sediul proceselor de sinteză a aminoacizilor, acizilor grași și monozaharidelor, precom și a metabolismelor intermediare în care sunt implicați acești compuși, joacă și un rol în depozitarea rezervelor metabolice reprezentate de glicogen și lipide. Glicogenul este stocat sub formă de granule de dimensiuni variate (cu diametrul de cca 25 nm în mușchi și cca 80 nm în hepatocite), iar lipidele apar sub formă de picături (diametrul de 0,2–0,5 μ m). În celulele adipoase, picăturile de lipide se aglomerează, ocupând practic cvasitotalitatea celulei, iar în celulele secretoare de hormoni steroizi se află mari cantități de colesterol esterificat.

2.3. MEMBRANA CELULARĂ (PLASMALEMA)

Complexul molecular lipoproteic care înconjură celula este considerat astăzi „organul care mediază și coordonează interacțiunile celulei cu toate componentele mediului, fie ele molecule mici, molecule mari sau alte celule” (Palade și Farquhar, 1981).

2.3.1. TIPURI DE BIOMEMBRANE ȘI ROLURILE LOR

Cu toate că structura și funcțiile membranelor biologice sunt în general unice, se pot descrie câteva tipuri morfo-funcționale de biomembrane: 1) membrana celulară propriu-zisă, care delimitează celula;

2) membranele organelor celulare, care delimitează compartimentele celulare descrise mai sus; 3) membranele specializate (sinaptice, mielinice etc.); 4) membranele tisulare de oatură epitelială în cazul unor organe și sisteme (codoteliu capilar, alveolar, mucoasa digestivă, epitelul renal etc.).

Aceste membrane îndeplinesc o serie de funcții fundamentale care, într-o succintă enumerare, ar fi:

– rol de delimitare fizico-chimică a mediului intracelular de cel extracelular;
– asigurarea distribuției asimetrice a componentelor ionice prin permeabilitatea selectivă și transportul activ. Această asimetrie stă la baza activității bioelectrice celulare, a transmiterii sinaptice, a proceselor de secreție și absorbție digestive și renale, a menținerii echilibrului hidro-electrolitic etc.;

– transferul de informație realizat prin hormoni, medicamente și alți stimuli fizico-chimici. Acești factori acționează frecvent prin receptori membranari specializați, determinând modificări ale activității celulare;

– rol de apărare și secreție prin fagocitoză, endocitoză și exocitoză;
– rol în recunoașterea intercelulară și apărarea imunitară;
– reglarea și limitarea creșterii organelor;
– roluri metabolice intracelulare (conversia chimiosmotică a energiei în ATP);
– adezivitatea și relațiile intercelulare;
– participarea la desfășurarea mecanismelor etiopatogenice ale unor afecțiuni.

2.3.2. COMPOZIȚIA CHIMICĂ ȘI STRUCTURA MOLECULARĂ A MEMBRANELOR CELULARE

Din punct de vedere chimic, membranele celulare sunt formate din lipide și proteine în părți egale, la care vin să se adauge polizaharide complexe din grupul ozidelor.

Lipidele membranare sunt în majoritatea lor (peste 60%) fosfolipide, formate dintr-un „cap polar” hidrofil și o „coadă” (catenă) hidrofobă. Datorită acestei caracteristici, ele intră în interacțiuni cu mediul apos, formând structuri moleculare cu arhitectură specifică în funcție de condiții. La interfața apă-aer ele formează spontan un film monomolecular, cu catenele hidrofobe orientate spre aer. În interiorul unui mediu apos formează spontan lamele bimoleculare cu capetele polare orientate spre exterior. Contaminarea acestor structuri cu ioni determină formarea unor structuri micelare hexagonale. În afara fosfolipidelor, membranele celulare mai conțin lipide neutre și steroli (colesterol), ce formează în apă structuri cilindrice și miceli apoase cu rol de rigidizare a straturilor bilipidice.

Proteinele membranare adăugate matricei lipidice membranoare sunt considerate, din punct de vedere funcțional, a fi structurale și bioactive (enzime, transportori, receptori etc.). În ultima vreme se izolează și se descriu tot mai multe proteine cu roluri specifice în diverse activități celulare. În înțelegerea modului în care se structurează spațial membrana celulară a fost necesară cunoașterea aprofundată a interacțiunilor proteolipidice în mediul apos. Ancorarea proteinelor în stratul bilipidic se realizează prin legături electrovalente și hidrofobe realizate la nivelul aminoacizilor polari și, respectiv, apolari hidrofobi. Datorită acestor legături, proteinele selecționează și organizează lipidele care, la rândul lor, determină structurile secundară și terțiară ale proteinelor. Proteinele se fixează pe, și în suprafața stratului bilipidic prin legături electrovalente, în timp ce în grosimea stratului legăturile sunt de tip hidrofob.

Aquaporinele reprezintă un grup de proteine omologe ale membranelor celulare, alcătuite din 6 domenii transmembranoare organizate în rețele ortogonale sub formă de homotetrameri, care constituie canale pentru transportul pasiv al apei și al unor molecule organice mici (uree, glicerol, acizi monocarboxilici). Ca proteine canal pentru apă, aquaporinele se găsesc îndeosebi în membranele eritrocitare și la nivel renal, fiind implicate în echilibrul osmotic transmembranar.

Una din primele dovezi experimentale ale prezenței aquaporinei în membrana eritocitară a fost adusă de profesorul dr. G. Benga de la Școala medicală clujeană cu doi ani înaintea (1986) „descoperirii” acesteia de către Peter Agre și MacKinnon, recent onorați cu premiul Nobel. Este o omisiune regretabilă și un nou act de oedreptate împotriva unui distins cercetător român, după cel comis contra prof. dr. N. Paulescu, adevăratul descoperitor al insulinei.

Dintre cele 6 aquaporine clasice și 3 aquagliceroporine, mai bine studiată este aquaporina-1 (AQP-1), a epitelului tubular. Fiecare din cei 4 monomeri ai AQP-1 asigură un flux de apă de ordinul a 10^{-6} molecule/canal/secundă. Substratul morfologic al selectivității porilor pentru apă este asigurat de forma de clepsidră a acestora cu vestibulul delimitat de resturi hidrofobe și hidrofile într-o configurație care să permită trecerea numai a apei. Astfel, filtrarea se realizează atât sterice prin dimensiunile porilor (0,28–0,30 Å) și chimic în funcție de distribuția aminoacizilor ce delimitează porul respectiv. Grupările amido de pe reziduurile de asparagină din pozițiile 76 și 192 formează o barieră electrostatică pozitivă, ce exclude protonii și ionii pozitivi (fig. 2.10).

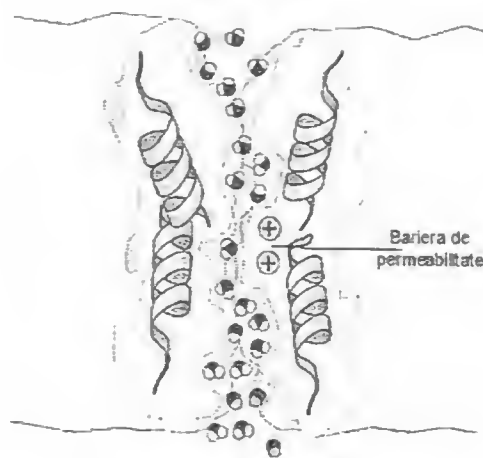


Fig. 2.10. Aquaporină – structură generică.

În timp ce AQP-1 predomină la om în membrana eritrocitară, tubul contort proximal, epitelul alveolar și ciliar, AQP-2 este concentrată la nivelul polului urinar și al tubulilor colector, cu rol modulator al acțiunii anti-diuretice a ADH. Mutația genetică a acesteia determină insensibilitatea renală la vasopresină și predispoziția la diabet insipid.

La rândul său, absența aquaporinei din cristalin produce cataractă la o vârstă foarte tânără.

În sistemul nervos central au fost identificate AQP-3, 5 și 8 în neuroni, precum și AQP-4, 5 și 9 în astrocite și celulele ependimare. Aquaporina AQP-4 predomină în organele periventriculare cu rol important în echilibrul hidric al encefalului și homeostazia lichidiană a întregului organism.

Deficitul experimental de AQP-4 determină o scădere marcată a edemului cerebral postischemic, sugerând posibilitatea funcției de osmoreceptor a acesteia la nivelul țesutului nervos cerebro-spinal.

Glucidele membranare (glicoproteine și glicolipide) sunt constituenți implicați în adezivitatea și antigenitatea celulară, precum și în geneza încărcării electrice, fenomene ce justifică interesul larg al cercetării lor. În această categorie se includ compuși sialici, mucoproteinele, cerebrozidele, ganglioizidele.

Un rol important în menținerea contactelor și adezivității celulare revine fibronectinei. Aceasta este o glicoproteină cu greutate moleculară mare, prezentă în matricea intercelulară și prevăzută cu capacitatea de a crește aderența și fixarea celulelor pe substratul inert al collagenului matriceal. Ea se găsește sub formă de fibronectină tisulară, insolubilă, și de fibronectina plasmatică, solubilă. Prima formează o rețea fină de filamente neregulate, dispuse la suprafața celulelor și pe țesutul conjunctiv aceluș, iar cea de a doua se găsește în plasmă, având origine predominant hepatică. În afara hepatocitelor, fibronectina plasmatică este

sintetizată la nivelul macrofagelor și celulelor endoteliale, realizând o concentrație de aproximativ 300 $\mu\text{g/ml}$. Între cele două forme există o stare de echilibru asigurată de fixarea unei părți din fibronectina plasmatică la nivel tisular. Aceasta a fost denumită „globulină insolubilă la rece”. La rândul său, fibronectina fibrilară de la nivel tisular poate fi sintetizată de fibroblaste, mioblaste, celule musculare, epiteliale, endocite, hepatocite, macrofage și celulele Schwann. Unele enzime proteolitice, cum sunt tripsina, chimotripsina, elastaza sau plasmina, pot hidroliza fibronectina intercelulară, determinând eliminarea ei de pe suprafața celulelor. Cantități dozabile de fibronectină au fost identificate și la nivel intracelular, cu ajutorul anticorpilor marcați cu fluoresceină sau peroxidază. Acestea sunt mult mai mici decât cele din spațiul extracelular, deși din punct de vedere imunologic sunt identice. Structura chimică a fibronectinelor este foarte apropiată, atât din punct de vedere al greutății moleculare, cât și al conținutului în proteine și hidrocarbonate. Greutatea lor moleculară este de 450 000 daltoni. Fibronectinele se compun din două subunități, cu greutate de 220 000 și, respectiv, 230 000 daltoni, legate prin două punți disulfidice, situate la extremitățile lanțurilor carboxiterminale. Fiecare din cele două subunități conține trei tipuri de omologii structurale dispuse sub formă de monomeri, în cazul fibronectinei solubile din plasmă, și de dimeri sau tetrameri, în cazul fibronectinei fibrilare. Componenta glucidică reprezintă doar 5%, fiind constituită din manoză, galactoză, glucozamină și acid sialic.

Fibronectina plasmatică, conținând mai puține hidrocarbonate, este mai expusă hidrolizei enzimatică. Interacțiunile moleculare ale fibronectinelor sunt multiple. Ele se fixează în primul rând pe collagenul matricei extracelulare. Afinitatea lor pentru forma denaturată a collagenului este de 200 de ori mai mare decât pentru forma nativă a acestuia.

Aderența celulelor la suprafețele acoperite de collagen se realizează prin intermediul fibronectinei. Aceasta se fixează, de asemenea, pe filamentele de fibrină, ca și pe fibrinogen. Complexele formate de fibronectină și fibrinogen pot precipita la rece, de unde denumirea de „globulină insolubilă la rece” dată inițial fibronectinei. În cheagul sanguin, fibronectina este fixată pe fibrină. De aceea, concentrația serică a fibronectinei este cu 20–50% mai mică decât a plasmiei. Datorită relațiilor cu fibrina, fibronectina participă la hemostază și refacerea țesuturilor lezate. Heparina, acidul hialuronic și condroitinsulfatul se pot fixa împreună cu proteoglicanii și glucozaminoglicanii pe fibronectină, consolidând matricea extracelulară. La nivelul suprafețelor celulare, inclusiv bacteriene și virale, fibronectina se fixează cu ajutorul situsului activ din porțiunea mediană a moleculei reprezentată de tetrapeptidul: arginină-glicină, asparagină-serină.

Datorită multiplelor interacțiuni moleculare și afinității pentru collagen, proteoglicani și glucozaminoglicani, fibronectinele participă la realizarea adezivității celulare, hemostazei și regenerării tisulare. La rândul lor, microfilamentele de fibronectină intrațelulare contribuie la organizarea citoscheletului și la diferențierea celulară. Transformarea celulară indusă de un virus sau o substanță omogenă se însoțește de scăderea conținutului celular în fibronectină. Aportul de fibronectină exogenă restabilește structura și aderența celulelor afectate. Dacă între diminuarea fibronectinei celulare și degenerarea tumorală există vreo relație, rămâne de stabilit.

În sfârșit, fixarea fibronectinei plasmatică pe bacterii, virusuri și paraziți favorizează adeziunea celulelor fagocitare, distrugerea microorganismelor respective și apărarea antiinfecțioasă nespecifică. Astfel, afinitatea fibronectinei pentru suprafețele celulare conferă acesteia funcții multiple, care depășesc cu mult rolul atribuit inițial, de constituent al matricei intercelulare.

Structura edificiului molecular ce constituie sistemul membranelor celulare nu este nici astăzi complet elucidată. Conceptul cu nuanță mecanicistă, introdus în prima jumătate a secolului de Danielli și Davson, conform căruia membrana celulară are o structură „în sandwich”, cu un strat bimolecular lipidic cuprins între două straturi proteice, a dominat biomembranologia timp de câteva decenii, suferind totodată modificări succesive, necesare explicării fenomenelor dinamice membranare pe măsura descoperirii lor. În 1957, Robertson elaborează conceptul membranei unice („unit membrane”), bazat pe aspectul electrono-optic trilamelar comun tuturor membranelor, cu un strat transparent central (hidrofob), mărginit de două straturi opace osmofile (hidrofile), ca în modelul Danielli-Davson. Progresul continuu al cercetărilor a adus tot mai multe dovezi în favoarea dinamicii și fluidității ansamblului moleculelor membranare. Acest progres s-a materializat în conceptul „mozaicului fluid” care, introdus în 1972 de Singer și Nicholson, reprezintă și astăzi cel mai credibil și utilizat model de arhitectură membranară (fig. 2.11). Membranele sunt astăzi considerate a fi formate dintr-un strat bilipidic fluid în care plutesc ca niște geamanduri moleculele proteice.

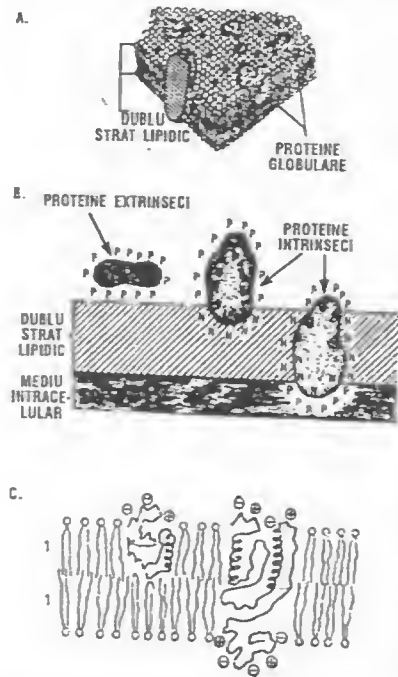


Fig. 2.11. Modelul în „mozaic lichid” al membranei celulare (după Singer și Nicholson). A: Reprezentare tridimensională. B: Localizarea proteinelor intrinseci și extrinseci; aminoacizii nepolari (N) corespund stratului bilipidic, iar cei polari (P) sunt situați spre periferie. C: Reprezentare schematică a stratului dublu de fosfolipide cu capătul polar orientat spre periferie. Secvențele proteice ce ies din stratul lipic prezintă încărcare electrică, putând contracta legături electrostatice.

Cuplându-se cu lipidele membranare, aceste molecule proteice formează subunități lipoproteice cu dispunere diferită în funcție de celulă, zona membranară și condițiile funcționale. Aceste subunități pot fi incluse sau de suprafață. Proteinele incluse traversează complet membrana, au o zonă centrală hidrofobă și două zone hidrofile pe fețele externă și, respectiv, internă ale membranei.

Ele sunt caracterizate printr-o mobilitate în general redusă în sens lateral. Sunt însă capabile de mișcări de „bobbing” (transversale), limitate în măsura ancorării lor de fața internă a membranei (pe citoschelet). Proteinele de suprafață sunt, în schimb, foarte active și au o mare mobilitate laterală, fiind capabile să se deplaseze pe distanțe apreciabile. Mișcarea lor este controlată metabolic. Această structură este delimitată de două zone de un interes funcțional covârșitor (fig. 2.12):

- *învelișul celular (glicocalix)*, situat la exteriorul membranei celulare și format din glicoproteine și glicolipide (vezi mai sus), care alcătuiesc o adevărată „atmosferă pericelulară”, delimitând un „micromediu” dispus între celula propriu-zisă și mediul extracelular;

- *citoscheletul membranar*, format din proteine dispuse și interconectate pe suprafața internă a stratului bilipidic. Aceste proteine, în majoritatea lor cu caracter contractil (spectrină, actină), constituie o zonă de ancorare atât pentru unele proteine incluse în membrană, cât și pentru sistemele contractile celulare. Rolul funcțional al zonei abia începe a fi descifrat dar, de exemplu, se presupune că aici ar avea loc procese de fosforilare și defosforilare, cu consecințe funcționale asupra unor procese dinamice celulare, cum ar fi fagocitoza, emiterea de pseudopode etc.

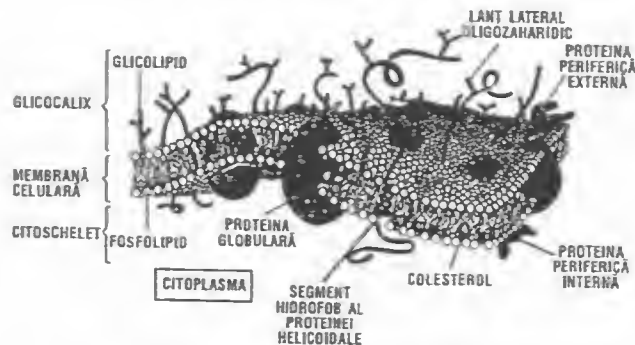


Fig. 2.12. Reprezentare schematică tridimensională a structurii membranei celulare.

2.3.3. TRANSPORTUL PRIN MEMBRANE BIOLOGICE

Oricare ar fi modul de existență al celulelor (solitar sau grupate în țesuturi), acestea au schimburi permanente și bidirecționale cu mediul în care trăiesc.

Expresia funcțională a transportului prin membrane a fost definită cu termenul de *permeabilitate selectivă*. Noțiunea definește permeabilitatea restrânsă a stratului lipidic care permite trecerea doar a moleculelor liposolubile, iar proteinele inserate în stratul bilipidic îi conferă caracterul de selectivitate.

Proteinele acționează în calitate de:

1. canale sau pori pentru variați ioni;
2. transportori specifici pentru unii metaboliți (aminoacizi, monozaharide etc.);
3. pompe care cresc (K^+) sau scad concentrația intracelulară (Na^+ , Ca^{2+}) în mod preferențial pentru anumiți ioni.

Permeabilitatea selectivă a membranei realizează o compoziție net diferită a mediului intracelular față de a lichidului extracelular.

2.3.3.1. Tipuri de transport prin membrane

Apreciind din punctul de vedere al substanțelor care sunt transportate (ioni sau molecule mici sau chiar particule), se disting sisteme de microtransfer și macrotransfer prin membrane.

Ionii și moleculele mici trec cu adevărat prin membrană, foarte rar prin bistratul lipidic, cel mai frecvent prin intermediul proteinelor intrinseci. Macromoleculele pot trece cu un fragment de membrană, deoarece sunt transportate în vezicule ce se desprind din plasmalema.

În cadrul sistemelor de microtransfer membranar, un criteriu bine stabilit de diferențiere a modalității de realizare este *consumul de energie*. Din acest punct de vedere, se disting două tipuri de transport:

- *transportul pasiv*, care se realizează fără consum de energie rezultată din metabolismul celular, substanțele străbătând membrana conform gradientului de concentrație (pentru substanțele neîncărcate electric) sau electrochimic pentru ioni;
- *transportul activ* se realizează cel mai frecvent împotriva gradientului de concentrație sau electrochimic și de aceea se produce cu consum de energie metabolică.

Foarte frecvent fluxurile ionice transmembranare sunt rezultatul ambelor tipuri de transport. Majoritatea substanțelor sunt transportate datorită proteinelor din structura membranei. După numărul speciilor de substanțe transportate se pot distinge:

- *sisteme de unitransport* – care transportă prin membrană o singură substanță;
- *sisteme de cotransport* – realizează transportul unei substanțe cuplat cu al alteia, sau chiar transportul cuplat al mai multor substanțe. În acest caz se distinge transferul „simport”, când transportul celor două substanțe sau al mai multor substanțe se realizează în același sens, și „antiport”, când transferul celor două substanțe se realizează în sens diferit (fig. 2.13).

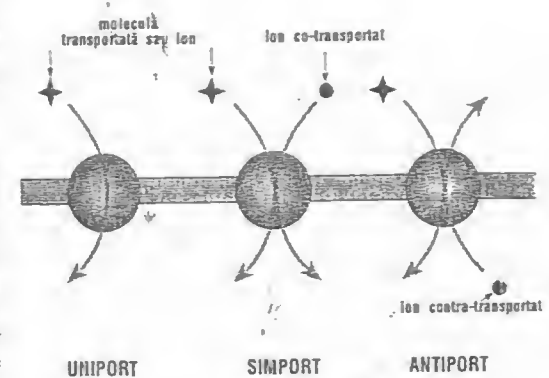


Fig. 2.13. Modalități de funcționare a proteinelor membranare cu rol de transportor (după Pacock și Richards).

Transportul pasiv. Substanțele liposolubile și ionii de talie mică pot traversa membranele biologice în sensul gradientelor.

Se disting următoarele tipuri de transport pasiv:

- difuziunea simplă;
- difuziunea facilitată.

Difuziunea simplă. Trecerea substanțelor prin membranele celulare fără intervenția vreunei molecule din structura acestora depinde de solubilitatea substanțelor respective. Astfel, particulele neutre din punct de vedere electric sau non-polare, cum ar fi O_2 , CO_2 și acizii grași, fiind foarte liposolubile, pot traversa facil membranele celulare. Viteza de trecere a acestor substanțe prin membrane este direct proporțională cu solubilitatea în lipide a substanței transportate. Totuși, pentru ca aceste substanțe liposolubile să treacă prin membrană, este necesară o forță care să acționeze. Această forță este generată de diferențele de concentrație între cele două compartimente separate prin membrană (diferența de potențial electric este implicată minor, fiind vorba de molecule cu polaritate redusă).

Difuziunea în sensul gradientului de concentrație. Toate moleculele dintr-un mediu fluid, lichid sau gazos sunt într-o continuă mișcare aleatorie (agitație termodinamică). Energia termică se manifestă atunci când mediile în cauză au o temperatură deasupra celei de zero absolut. În aceste circumstanțe, moleculele intră în coliziune, căpătând o mișcare de recul, asemănător bilelor de biliard în mișcare, realizându-se amestecul acestora. Acest amestec aleator al moleculelor poartă numele de *difuziune*. Coliziunea dintre moleculele dintr-un mediu este cu atât mai probabilă și, deci, cu atât mai mare, cu cât concentrația acestora este mai mare.

Dacă două soluții separate de o membrană sunt de concentrație diferită, se creează un gradient de concentrație sau „gradient chimic” între cele două compartimente. În condițiile instalării acestui gradient, coliziunea dintre molecule este mult mai frecventă în compartimentul mai concentrat decât în cel diluat, încât un număr mai mare de molecule din compartimentul mai concentrat trece în cel mai diluat decât în sens invers (fig. 2.14).

Deci, deși în ambele compartimente moleculele sunt antrenate în mișcări aleatorii, se creează o forță care realizează un flux net prin difuziune a particulelor din sectorul mai concentrat spre cel mai diluat. Diferența de molecule care trec între cele două compartimente, măsurată în flux de substanță (molecule), realizează un proces de difuziune netă și continuă până când concentrația din cele două compartimente devine egală. În aceste circumstanțe, agitația termică se manifestă în continuare, dar numărul de molecule care părăsesc un compartiment este egal cu numărul de molecule care vin din celălalt compartiment și se instalează o „stare de echilibru”, în care fluxul net de particule devine nul.

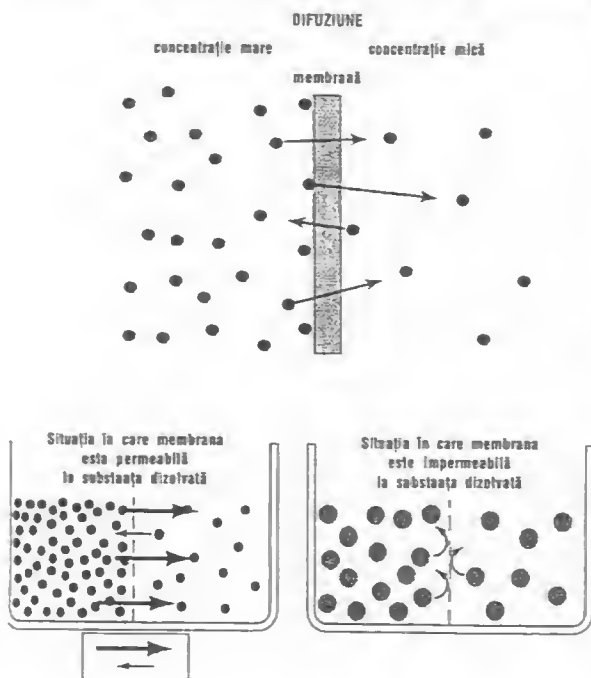


Fig. 2.14. Schema fenomenului de difuziune prin membrană (după Sherwood – modificată).

Schimburi în gradient electric. Multe substanțe din lichidele organismului se găsesc în stare disociată (cationi – particule încărcate pozitiv, și anioni – particule încărcate negativ). Mișcarea ionilor în și între diferitele compartimente ale organismului depinde de încărcarea electrică a acestora, știut fiind faptul că particulele încărcate electric identic se resping, iar cele care au încărcare electrică diferită se atrag. Dacă între două regiuni din organism există diferențe de sarcini electrice, anumiți cationi (ioni încărcăți pozitiv) se vor deplasa spre zonele mai bogate în sarcini negative și, invers, anionii se vor deplasa spre zonele electropozitive. Această diferență de încărcare electrică între diferitele părți ale organismului realizează un „gradient electric” în care se deplasează ionii în tendința de instalare a „stării de echilibru” (fig. 2.15.).

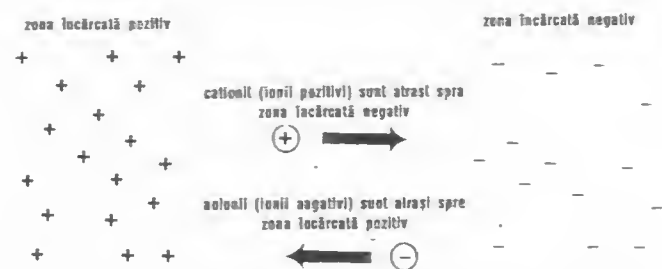


Fig. 2.15. Difuziunea ionilor în mediu cu zone de încărcare electrică (după Sherwood).

Existența concomitentă a unui gradient electric și a unui gradient chimic asigură deplasarea substanțelor în sensul gradientului electro-chimic. Difuziunea conform gradientului electro-chimic este deci legată de forțele electrice generate de diferența de potențial de o parte și de alta a membranelor celulelor vii.

Difuziunea, fiind un proces care este rezultat al agitației termice a particulelor dintr-un mediu fluid (lichid sau gazos), se produce în tendința realizării unei stări de echilibru, adică a egalizării concentrației substanțelor (polare sau nepolare) de o parte și de alta a membranei.

Transportul substanțelor prin proces de difuziune nu depinde însă numai de solubilitatea acestora, ci și de mărimea moleculei transportate, ca, de altfel, și de grosimea membranei prin care se realizează transportul.

Ținând cont de acești factori, Fick a calculat viteza de difuziune pentru o anumită specie de moleculă (legea I Fick), care precizează că aceasta este direct proporțională cu gradientul transmembranar al substanței și cu coeficientul de difuziune (care depinde de mai mulți factori, inclusiv solubilitatea și mărimea moleculei) și invers proporțională cu grosimea membranei.

$$\mu = \Delta (c_e - c_i) / X,$$

unde

μ = viteza de difuziune;

Δ = coeficientul de difuziune;

X = grosimea membranei;

c_e = concentrația substanței în mediul extracelular;

c_i = concentrația substanței în mediul intracelular.

Raportul Δ/X definește permeabilitatea membranei pentru substanța în cauză.

Osmoza. Agitația termică se aplică în aceeași măsură și moleculelor de apă dintr-un fluid, așa încât apa poate trece printr-un proces analog celui descris pentru difuziunea solutului (fig. 2.16).

În mod normal, în stare de echilibru trecerile moleculelor de apă dintr-un sens în celălalt sunt echivalente, încât fluxul net al moleculelor de apă este nul. Numai astfel volumul celular rămâne constant. În anumite condiții poate să apară o diferență de „concentrație” transmembranară, în sensul că de o parte și de alta a membranei există o diferență de concentrație a unor solviți nedifuzibili, încât apa va fi atrasă din mediul mai puțin concentrat spre mediul mai concentrat. Se creează în aceste condiții un flux hidric net, care traversează membrana celulară. Acest flux hidric net poartă numele de osmoză.

Fenomenul pur de osmoză poate fi evidențiat în condițiile în care soluții de concentrație diferită sunt separate de o membrană așa-zis „ideală” (ferocianura de cupru și, de ce nu, epiteliul ramului ascendent al ansei Henle), care este impermeabilă pentru solviți, dar permeabilă pentru solvenți. Ca urmare, se va produce o deplasare a moleculelor de solvent (apă) prin membrană în compartimentul în care concentrația solviților este mai mare, până se ajunge la starea de echilibru când fluxul net de apă este nul (fig. 2.16).

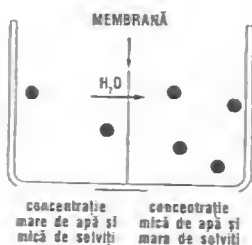


Fig. 2.16. Mecanismul osmozei (după Sherwood).

Teoria cinetică moleculară explică și osmoza; în soluția mai diluată moleculele de apă (solvent) prezintă agitație moleculară mai mare decât moleculele de apă din soluția mai concentrată, a căror activitate este diminuată (obstrucționată) de numărul mare de particule ale solvitului. În realitate, osmoza este o proprietate particulară a apei, însă, în același timp, ea este și rezultatul efectului de atragere a moleculelor, dezvoltat de substanțe dizolvate. Potențialul chimic al apei este mai scăzut într-o soluție decât al apei pure. Ca urmare, între apa pură și o soluție apoasă separate printr-o membrană se va stabili o „diferență de potențial”, iar starea de echilibru se va stabili numai în una din situațiile următoare:

1. se poate realiza o distribuție liberă a substanțelor solvite; acest proces nu este posibil decât în condițiile în care substanțele solubile sunt difuzibile, iar membrana este permeabilă;
2. apa poate să treacă prin membrană diminuând diferența de potențial; diluând soluția; este cazul osmozei pure, când substanțele nu sunt difuzibile;
3. membrana dă posibilitate de deplasare atât apei, cât și substanțelor solvite, circumstanțe în care concomitent au loc atât procese de difuziune, cât și de osmoză (fig. 2.17).

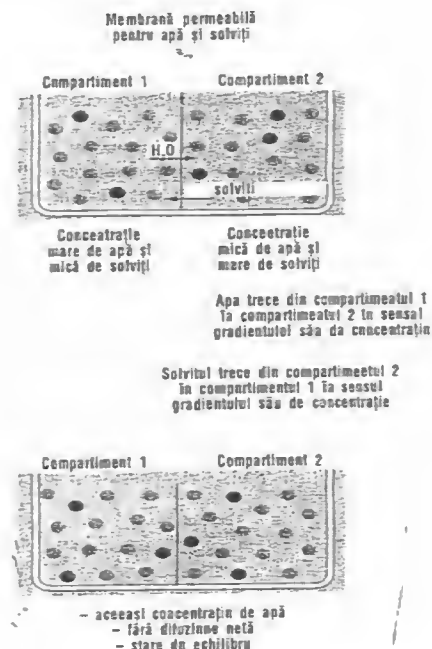
Osmoza are o mare importanță în fiziologie, întrucât ea dirijează repartizarea apei între mediul intracelular și cel extracelular și, în același timp, între diferitele compartimente ale spațiului extracelular; spre exemplu între compartimentul intravascular (sângele) și celelalte compartimente extracelulare (lichidul interstițial etc.).

Presiunea osmotică (efectul osmotic) a unei soluții nu depinde, deci, decât de numărul de particule din soluție (molecule, ioni, miceli coloidale etc.) și nu de mărimea lor sau de greutatea lor moleculară.

Presiunea osmotică se exprimă în *osmoli* sau *miliosmoli*; 1 Osmol = 1 000 de miliosmoli = efectul osmotic ideal dezvoltat de solviți și are valoarea de 22,4 atmosfere.

Efectul osmotic al unui amestec de substanțe dizolvate este egal cu suma efectelor osmotice pentru fiecare substanță luată separat.

Fig. 2.17. Desfășurarea concomitentă a fenomenelor de osmoză și difuziune a solvitului (după Sherwood).



Soluțiile care au aceeași presiune osmotică sunt *izoosmotice* sau *izotonice*. În fiziologie, ca, de altfel și în clinică, este necesar să se cunoască aceste noțiuni, întrucât celulele sunt viabile și își pot desfășura activitatea numai într-un mediu izoton. Uneori, în practica medicală se folosesc soluții cu osmolaritate inferioară mediului intern – *hipotonice* – sau cu osmolaritate superioară – *hipertonice*.

Osmolaritatea mediului intern are valoarea de 290 mOsm și reprezintă o constantă homeostatică care este menținută printr-un mecanism deosebit de complex – *mecanismul osmotensioreglator*, în cadrul căruia s-au diferențiat receptori specifici – *osmoreceptori* – prezenți în regiunea diencefalică a sistemului nervos central.

Difuziunea facilitată. Unele substanțe trec prin membranele celulare tot conform gradientelor de concentrație și electro-chimice ca și în cazul procesului de difuziune simplă, dar cu participarea unui component membranar de natură proteică.

Aceste particularități ale difuziunii facilitate sunt deci rezultatul participării la procesul de transport al unui constituent membranar, cel mai adesea de natură proteică. Acesta recunoaște și fixează mai mult sau mai puțin specific solvitul, accelerând transportul său. Aceste proteine se comportă ca niște enzime prezente în membrană, difuziunea facilitată având caracteristici comune cu procesele catalizate enzimatic. Se descriu procese de difuziune facilitată pentru anioni, uree, glicerol etc.; în cazul membranei eritrocitare pentru glucoză; unii aminoacizi se absorb astfel la nivelul membranei diverselor celule din organism etc.

Dinamica procesului de difuziune facilitată ar fi:

- recunoașterea substanței de transportat pe una din fețele membranei;
- fixarea substratului de către transportor, analog cu legarea substratului de enzimă;
- urmărirea etapă, „neclară din multe puncte de vedere”, constă în traversarea membranei, proces care uneori este etichetat prin termenul de translocare.

Toate proteinele transportoare traversează membrana de pe o față pe cealaltă și au capacitatea să-și modifice conformația în așa fel încât situsurile lor de legare cu substanța de transportat să fie expuse alternativ pe cele două fețe ale membranei. Caracteristicile funcționale ale transportorilor depind de natura și cantitatea de substanță care este de transportat și constau în: specificitate, saturabilitate și competiție.

– **Specificitatea:** fiecare transportor este diferențiat pentru transportul unei substanțe sau cel mult al unor substanțe foarte apropiate din punct de vedere chimic. Această particularitate a transportorului participă la conferirea caracterului de selectivitate a permeabilității membranare.

– **Saturația:** cantitatea de substanță care poate fi transportată prin membrană într-un interval de timp este limitată. Această limită este cunoscută sub numele de transport maximal (T_m).

Cât timp transportul maximal nu a fost atins, numărul de situsuri acceptoare ocupate de substanța în cauză este proporțional cu concentrația substanței. În aceste circumstanțe, dacă substanța de transportat va fi în concentrație superioară, va crește și cantitatea transportată în unitatea de timp. Când transportorul este

saturat (s-a atins T_m), adică toate situsurile acceptoare au fost ocupate, debitul de transport al substanței este maximal și nu poate să mai crească, chiar dacă concentrația substanței din amestec crește.

– **Competiția:** în anumite cazuri, substanțele chimice apropiate pot utiliza același transportor pentru a traversa membrana. În aceste circumstanțe, dacă în contact cu transportorul se găsesc mai multe astfel de substanțe, cantitatea substanței transportate în unitatea de timp va fi mai mică decât în situația în care aceasta ar fi fost singură. Astfel, când două sau mai multe specii moleculare utilizează același transportor, capacitatea de transport a fiecărei substanțe se reduce datorită fenomenului de competiție.

Cel mai concludent exemplu de difuziune facilitată îl oferă transportul glucozei în interiorul celulei. Este știut faptul că glucoza este consumată neconținut la nivel celular, creându-se astfel un gradient celular – lichid interstițial favorabil unui proces de difuziune netă către celulă. Glucoza, fiind însă o moleculă polară, nu poate traversa membrana prin mijloace proprii, așa încât în membrana celulară s-a diferențiat un transportor care poate lega reversibil molecula de glucoză, realizând un proces de difuziune facilitată.

Spre deosebire de difuziunea simplă, care se desfășoară proporțional cu gradientul de concentrație, difuziunea facilitată este limitată în unitatea de timp datorită saturabilității situsurilor de legare a substanței de membrană (fig. 2.18).

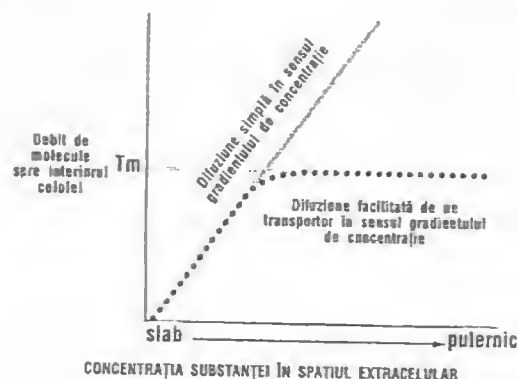


Fig. 2.18. Influența gradientului de concentrație asupra difuziunii simple și facilitate (după Sherwood).

Transportul pasiv al moleculelor hidrosolubile prin membranele celulare. Moleculele hidrosolubile pot traversa membrana celulară cu ajutorul unor proteine membranare care se pot comporta sub formă de canale ionice, transportori sau ionofori.

Canalele ionice: unele proteine integrale din structura membranei celulare pot crea căi hidrofile care traversează membrana sub forma unor canale, permițând astfel trecerea, conform gradientelor, a unor molecule mici sau ioni hidrofili. Existența canalelor membranare a fost dovedită prin utilizarea unor tehnici de electro-fiziologie deosebit de selective, cum ar fi: tehnica potențialului impuls; tehnica „patch-clamp”.

Fără a intra în detalii de descriere a acestor metode, este de menționat că se lucrează fie pe membrana integrală (tehnica potențialului impuls), fie pe fragmente de membrană celulară (patch). Se culege cu ajutorul microelectrozilor potențialul electric transmembranar și se menține la o valoare prestabilită, fluxurile transmembranare de ioni fiind compensate prin injecție de electroni, cu înregistrarea curentului electric respectiv, ce indică valoarea curentului ionic menționat.

Se presupune că există canale ionice selective, „specifice”, pentru fiecare specie ionică principală (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^-). Până în prezent, au fost izolate și au fost caracterizate canalele de Na^+ , K^+ și unele canale de Ca^{2+} și de Cl^- .

Selectivitatea canalelor este determinată de existența unor zone specializate în structura canalului, numite și „filtre de selectivitate”, care devin permeabile („deschis”) sau impermeabile („închis”) în funcție de anumite condiții extra sau intracelulare (fig. 2.19).

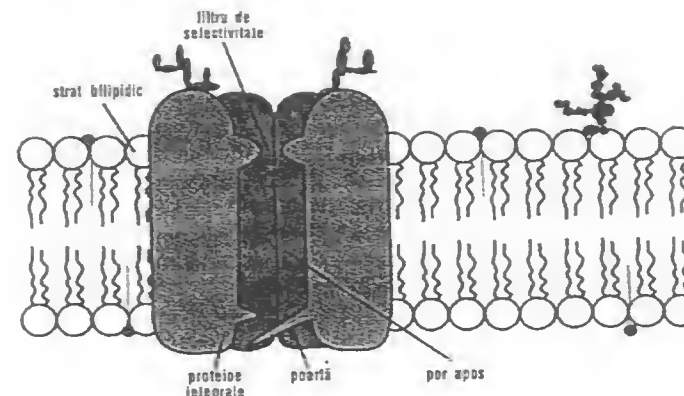


Fig. 2.19. Organizarea funcțională a unei proteine-canal din membrana celulară (după Rhoades și Tanner).

Permeabilizarea sau închiderea canalelor sunt controlate de numeroși factori:

- diferența de potențial dintre cele două fețe membranare – canale voltaj-dependente,
- anumite substanțe exogene sau endogene,
- simple fluctuații conformaționale spontane.

Funcționarea canalelor ionice: ansamblul de funcționare al canalelor ionice din membrana unei celule este responsabil de variațiile de potențial transmembranar și de apariția potențialului de acțiune.

Canalele de sodiu – joacă un rol major în generarea potențialului de acțiune în numeroase celule excitabile, neuronul, fibra musculară striată scheletică și cardiacă etc. Aceste canale, „voltaj dependente”, au cel puțin două „filtre” sau „bariere de permeabilitate”: m și h (fig. 2.20).

În repaus, bariera „ m ” este închisă, iar bariera „ h ” este deschisă. Dacă un stimul determină o depolarizare limitată a membranei se produce deschiderea barierei „ m ” și Na^+ intră în celulă datorită gradientului transmembranar, accentuând fenomenul de depolarizare. Această depolarizare deschide la rândul ei alte canale de Na^+ voltaj-dependente și așa mai departe, trecând potențialul de membrană din domeniul valorilor negative înspre sau chiar în domeniul pozitiv. Intrarea Na^+ se oprește prin închiderea automată a barierei „ h ”. Analizându-se cinetica fluxurilor ionice prin canalele membranare s-a ajuns la concluzia că fiecare canal odată activat rămâne deschis un anumit interval de timp după care se închide automat.

După închiderea canalelor de Na^+ , potențialul de membrană revine progresiv la valoarea sa de repaus ca urmare a refluxului de K^+ prin canale voltaj-dependente, a difuziunii spre citoplasmă a ionilor de Na^+ pătrunși și a activității pompei de Na^+ și K^+ , care restabilește diferența de concentrație a acestor ioni de o parte și de alta a membranei.

Canalele de potasiu – prezente mai ales în membrana celulelor așa-zis „excitabile”, prezintă particularități de la o specie la alta. Se descriu canale de K^+ care participă la depolarizare și canale care intervin în procesul de repolarizare. Unele canale de K^+ au deschiderea maximală în momentul în care canalele de Na^+ se închid.

Canalele de calciu – se găsesc în membrana unor celule la care potențialul de acțiune odată instalat trebuie menținut o perioadă mai îndelungată. Ele se deschid de obicei la o valoare mai ridicată a

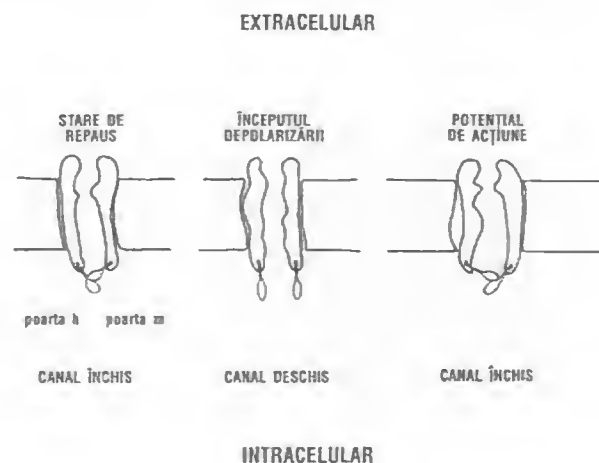


Fig. 2.20. Cinetica funcțională a canalului de sodiu voltaj-dependent (după Pacock și Richards).

potențialului membranal. În celula musculară netedă potențialul de acțiune este rezultatul activării și inactivării numai a canalelor de Ca^{2+} și de K^+ .

În unele situații, când canalul face parte dintr-un ansamblu molecular complex conținând o subunitate de recunoaștere (receptor), deschiderea sa poate fi declanșată de cuplarea semnalului chimic din mediul extracelular (mediator chimic, hormon etc.) cu receptorul. În acest mod, după cuplarea mesagerului cu receptorul, canalul ionic din complexul receptor – canal ionic se deschide și au loc fluxurile ionice caracteristice stării de excitație celulară, uneori și cu deschiderea unor canale voltaj-dependente generatoare de potențial de acțiune (fig. 2.21).

Transportori și ionofori. Termenul de difuziune facilitată este bazat pe observația că transportul prin difuziune pasivă și evidentă ajunge la rate care nu pot fi explicate ca un fenomen de difuziune simplă, în sensul că fluxul solviților nu se derulează de manieră liniară. De aceea, transportul mediat de transportori este în mod obișnuit mai complex decât difuziunea facilitată.

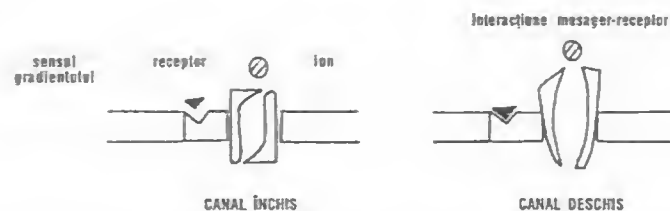


Fig. 2.21. Schema de funcționare a unui canal ionic receptor-operat (după Pacock și Richards).

Un **transportor** (carrier) poate fi definit operațional ca o proteină membranală care leagă (fixează) un ion de o parte a membranei, apoi în care își schimbă conformația spațială, iar după ce eliberează substratul de cealaltă parte a membranei revine la starea inițială cu posibilitatea de a relua ciclul.

Transportorii fac oficiul de trecere a substanțelor de o parte în cealaltă a membranei întrucât ei realizează o cavitate hidrofilă mărginită de proteină membranală în timp ce exteriorul este lipofil (fig. 2.22).

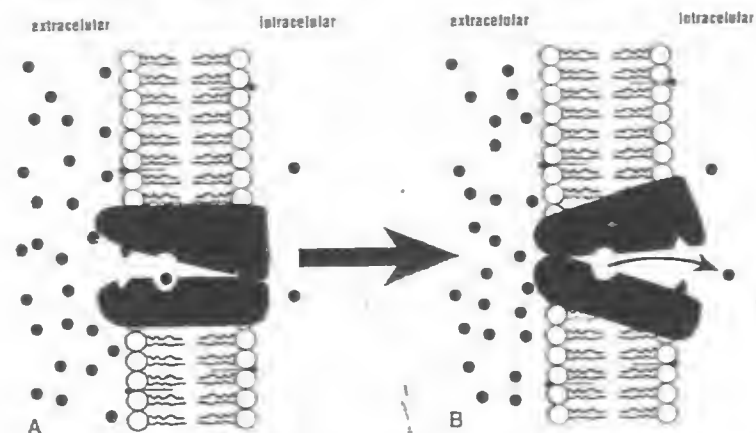


Fig. 2.22. Schema simplificată de funcționare a unui transportor membranal (după Rhoades și Tanner).

Ionoforii sunt transportori membranari endogeni (naturali) sau de proveniență exogenă (artificiali) care măresc permeabilitatea membranală pentru anumiți ioni. Spre deosebire de transportori, care sunt proteine integrale, ionoforii realizează transportul transmembranar datorită posibilității de a realiza deplasarea în suveică dinspre fața externă spre cea internă și viceversa, prin membrana celulară. Valinomicina se consideră a fi ionofor de K^+ , întrucât crește permeabilitatea membranală pentru acest ion, iar gramicidina ar fi ionofor pentru ionul de sodiu.

Aceste substanțe cu afinitate mare pentru anumiți ioni, prin transconformare după ce au fixat ionul, funcționează ca o navetă transmembranară sau se pot asocia în vederea realizării unor adevărate punți hidrofile transmembranare facilitând difuziunea substanței.

Rata de transport la nivelul unei celule al acestor sisteme de transportori depinde de constanta de afinitate a lor pentru substanța transportată și de densitatea acestora în membrana celulară.

Interpretările foarte apropiate ale mecanismului de transport pasiv prin canale ionice și transportori și ionofori au condus către studii care au scos în evidență că cele două modalități de transport se deosebesc în fond prin viteza cu care se realizează transportul. Este vorba probabil de un aspect gradual al procesului și, de aceea, canalele ionice și transportorii transmembranari sunt discutați împreună.

Transportul activ. Procesele de transport activ sunt capabile să concentreze o substanță într-unul din compartimentele organismului sau să realizeze o mișcare în direcție inversă proceselor de difuziune. Toate tipurile de transport activ prezintă o caracteristică comună, și anume generarea fluxului net al particulelor se realizează cu „consum obligatoriu al unei părți din energia totală a sistemului”. Dacă energia consumată nu este regenerată, transportul se oprește în momentul în care energia sistemului este diminuată, până la punctul de echilibru termodinamic. Condiția „sine qua non” pentru derularea procesului de transport activ este cuplarea directă sau indirectă între mecanismul de transport și metabolismul celular.

În organismele vii energia necesară transporturilor active este reînnoită permanent datorită metabolismului substanțelor energetice. De altfel, în momentul inițierii sau al intensificării procesului de

transport activ se produce și o creștere a ratei metabolismului energetic și invers în condițiile scăderii proceselor de transport activ.

O altă caracteristică a transporturilor active este că se pot realiza împotriva gradientelor de potențial electrochimic.

În ultimul timp se descrie și un alt tip de transport activ, denumit „translocare în grup”, în cadrul căruia are loc o modificare biochimică a solvitului.

Transportul activ interesează un mare număr de ioni; reacția energetică care îl realizează are ca sursă de energie ATP. În cadrul acestei reacții, o ATPază servește ca intermediar comun pentru cele două procese: hidroliza ATP și transportul ionului. Energia rezultată din hidroliza ATP se poate cupla cu proteina transportoare în două moduri:

- direct, în cazul transportului activ primar;
- indirect, utilizând și gradientul de concentrație ionică dintre compartimentele separate prin membrană, în cazul „transportului activ secundar”.

Transportul activ primar. Transportul activ primar se realizează de către o proteină care, în același timp, are și rol de enzimă ce hidrolizează substratul energetic (de obicei ATP). În cursul acestui proces de hidroliză a ATP, proteina-enzimă se fosforilează, moment în care își modifică fie afinitatea situsului de legare a ionului, fie conformația. În ambele cazuri, autofosforilarea antrenează o asimetrie de deplasare a substanțelor transportate prin membrană.

S-au identificat mai multe astfel de proteine-enzime transportoare. Toate au activitate ATPazică și participă la transportul activ al ionilor.

Na^+, K^+ -ATPaza este prezentă în plasmalema celor mai multe celule animale, dar și în membrana unor celule vegetale. Ea se comportă ca o adevărată „pompă de Na^+, K^+ ” ce transportă Na^+ în afara celulei și K^+ în celulă, realizând în repausul celular o concentrație foarte mare a Na^+ în afara celulei și a ionului de K^+ în interiorul acesteia. Deși ascunde încă necunoscut, Na^+, K^+ -ATPaza este cea mai bine caracterizată dintre aceste tipuri de enzime. Na^+, K^+ -ATPaza este alcătuită din două subunități mari (alfa) care străbat membrana și două subunități (beta) care sunt expuse la exteriorul celulei; este deci un tetramer (fig. 2.23).

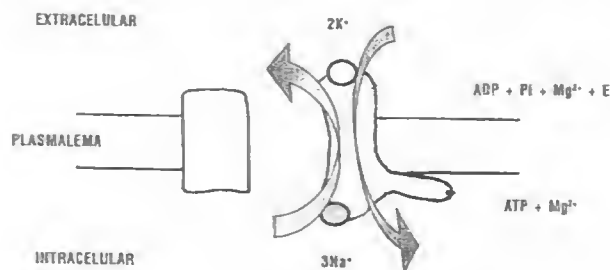


Fig. 2.23. Reprezentare schematică a Na^+, K^+ -ATPazei.

Fiecare unitate funcțională prezintă un situs de fosforilare cu activitate ATPazică, trei situsuri de legare a ionilor de Na^+ , două situsuri pentru legarea ionului de K^+ și un situs de fixare a ouabainei (glicozid cardiac).

Prezența aproape ubicuitară și funcționarea neconținută în organismele animale face ca peste 1/3 din ATP consumat de un organism animal în repaus să fie folosit în acest proces. În timpul unui ciclu de funcționare, pompa transportă în exterior „ 3Na^+ ” și introduce în celulă „ 2K^+ ”.

Etapile ciclului încep cu activarea situsului enzimatic, urmată de hidroliza ATP cu fixarea a trei ioni de sodiu ce ocupă situsurile specifice. Pompa fixează radicalul fosfat și își schimbă conformația. În etapa următoare, ionii de Na^+ sunt eliberați și ATP eliberează energie prin hidroliză în ADP și radical fosfat.

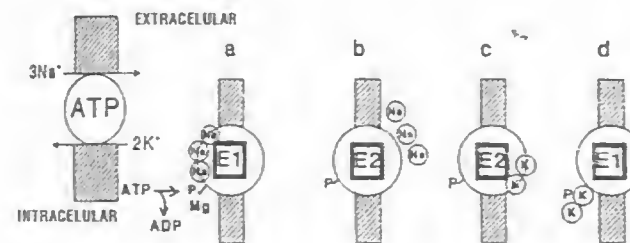


Fig. 2.24. Reprezentarea ciclului de activitate a Na^+, K^+ -ATPazei (după Greger și Windhorst).

Ultima etapă cuprinde fixarea a doi ioni de K^+ din exteriorul celulei, urmată de transportul lor în citosol, ca urmare a unui alt proces de transconformare. În această etapă se eliberează și radicalul fosfat de către pompă, aceasta fiind capabilă să-și reia ciclul (fig. 2.24).

Ca^{2+} -ATPaza este prezentă sub două forme majore, una în plasmalemă și cealaltă în membrana reticulului endoplasmic, dar și în alte membrane.

H^+, K^+ -ATPaza din celulele mucoasei gastrice pompează H^+ în afara celulei și introduce K^+ în celulă oxintică gastrică.

H^+ -ATPaza - „pompa protonică”, este mai bogat reprezentată în membrana celulară a tubului urinar, în membrana mitocondrială și în membrana lizozomilor, unde servește la sinteza ATP din ADP și acid fosforic, deci este o ATP-sintetază.

Transportul activ secundar. Fenomenele de transport activ primar realizează și mențin diferențe de potențial electrochimic. Transportul activ secundar reprezintă baza transportului activ a numeroși ioni, a glucozei, a unor aminoacizi etc. Acest proces este posibil întrucât, odată cu ionul transportat activ la transportor, se poate cupla un alt solvit. Acest ansamblu poartă numele de ansamblu „port”. Dacă transportul solvitului se realizează în același sens cu ionul procesul este etichetat drept „co-transport” sau „simport”, iar dacă solvitul este transportat în sens invers ionului se realizează un „contratransport” sau „antiport”. Astfel, glucoza, unii aminoacizi etc. sunt transportați în celulă secundar transportului activ de Na^+ (simport), iar ionii de calciu sunt îndepărtați din citosol și printr-un transport secundar ionului de sodiu (antiport) (fig. 2.25).

Mecanismele proceselor de transport activ secundar sunt diferite față de transportul activ primar. Diferența majoră constă în faptul că în cazul transportului activ secundar energia este furnizată de gradientul de concentrație. Gradientul

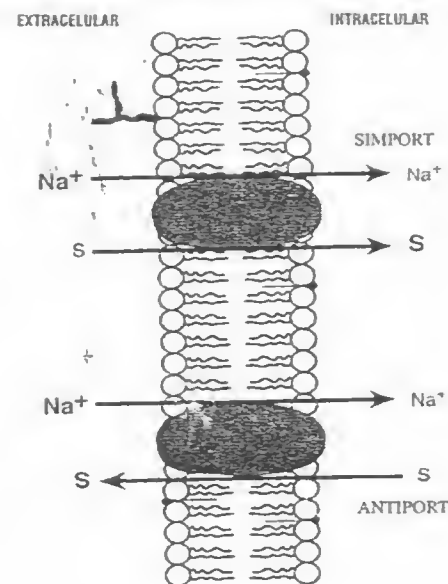


Fig. 2.25. Modulul de cuplare cu transportul sodiului a transportului unei alte substanțe în regim de transport activ secundar (după Pacock și Richards).

electrochimic al ionului de sodiu între exteriorul celulei și interiorul acesteia, realizat prin procesul de transport activ primar al acestui ion (pompa Na,K), reprezintă un mijloc de înmagazinare de energie care poate fi utilizată pentru funcționarea sistemelor de transport activ secundar. În acest sens, este de subliniat faptul că inhibarea producerii de ATP (ouabaina) într-o celulă determină într-o primă fază oprirea transportului activ al sodiului cu scăderea consecutivă a gradientului transmembranar al ionului de sodiu, urmate de oprirea transportului activ secundar care depinde de gradientul de sodiu drept sursă de energie. Trecerea ionilor și, în special, a ionului de Na⁺ din compartimentul în care acesta se găsește în concentrație crescută (cu nivel energetic ridicat) în compartimentul cu concentrație scăzută (nivel de energie coborât) furnizează energie pentru realizarea transportului activ al altui solvit împotriva gradientului său (transport activ secundar). Este de reținut faptul că energia înmagazinată într-un gradient transmembranar de concentrație ionică poate, de asemenea, să servească la sinteza de ATP din ADP și radical fosfat. Spre exemplu, transportul de electroni în lanțul fosforilărilor oxidative mitocondriale produce un gradient de concentrație a protonilor (H⁺) de o parte și de alta a membranei mitocondriale. În aceste circumstanțe, deplasarea ionilor de hidrogen în sensul gradientului, strict la nivelul proteinei numite ATP-sintetază, furnizează energie pentru sinteza de ATP (proces de fosforilare oxidativă).

Similar proceselor de difuziune facilitată și proceselor de transport activ primar și în cazul transportului activ secundar, legarea solvitului de transportat de proteina transportoare reprezintă o etapă obligatorie. Acest transportor proteic prezintă o serie de proprietăți particulare, cum ar fi specificitatea chimică și saturația situsurilor de legare pentru substanța de transportat. Specificitatea chimică îi permite proteinei transportoare să realizeze transportul numai al unei substanțe date, iar saturația situsurilor de legare îi plafonează viteza maximă de transport.

Proteina din cadrul sistemului de transport activ secundar mai are și un situs de legare a unui ion alături de situsul de legare a substanței de transportat. Cel mai frecvent, proteina transportoare leagă ionul de sodiu, dar și anionii bicarbonic sau clor și ionii de potasiu pot fi legați în cursul procesului de transport activ secundar.

Legarea ionului de proteina transportoare în cadrul sistemului de transport activ secundar produce modificări comparabile cu cele ce apar în cadrul sistemului de transport activ primar, și anume:

- fie modificarea afinității situsului ce leagă substanța de transportat prin proces activ secundar;
- fie o modificare a vitezei prin care transportorul proteic deplasează situsul de legare de pe o față pe alta a membranei.

În derularea procesului de transport activ primar, proteina transportoare suferă o modificare covalentă ca rezultat al fixării unui radical fosforilat ce provine din degradarea ATP. În cazul transportului activ secundar, proteina transportoare suferă o modificare alosterică ca urmare a fixării ionului.

Între Na⁺-K⁺-ATPaza și transportorul care leagă ionul de sodiu în cadrul sistemului de transport activ secundar există legături indirecte foarte importante. Realizarea gradientului de concentrație între exteriorul și interiorul celulei pentru ionul de sodiu, ca urmare a proceselor de transport activ primar, reprezintă un mijloc de înmagazinare de energie care poate servi la realizarea fenomenelor de transport activ secundar. Deci, energia utilizată pentru realizarea procesului de transport activ secundar provine în mod indirect din procesele metabolice intracelulare, întrucât gradientul de concentrație a fost realizat prin scindarea ATP de către Na⁺-K⁺-ATPaza. De aceea, inhibarea proceselor metabolice generatoare de ATP este urmată și de oprirea proceselor de transport activ secundar.

Recapitulând, în cadrul proceselor de transport activ secundar, ionul de sodiu se deplasează întotdeauna din mediul extracelular, unde se găsește în concentrație foarte ridicată, în interiorul celulei, unde concentrația sa este scăzută, deci în sensul gradientului său de concentrație, în timp ce substanța de transportat este deplasată împotriva gradientului său de concentrație, adică din compartimentul cu concentrație scăzută în cel în care concentrația este ridicată.

Prin procese de transport activ secundar cuplate cu ionul de sodiu sunt transportate numeroase substanțe organice dar și unii ioni. Astfel, acizii aminați sunt transportați în acest mod în majoritatea celulelor, realizându-se concentrații intracelulare de două până la douăzeci de ori superioare lichidului extracelular. Un mecanism similar este utilizat de enterocit pentru transportul glucozei. Transportul glucozei din lumenul intestinal în sânge se realizează în două etape. Astfel, din lumenul intestinal în enterocit glucoza este transportată în cuplu cu ionul de sodiu realizându-se concentrarea acesteia în celulă. Din enterocit glucoza este transportată în lichidul interstițial al vilozității de către o altă proteină transportoare,

dependentă de concentrația extracelulară a ionului de sodiu, prezentă la nivelul regiunii latero-bazale a membranei celulare (fig. 2.26).

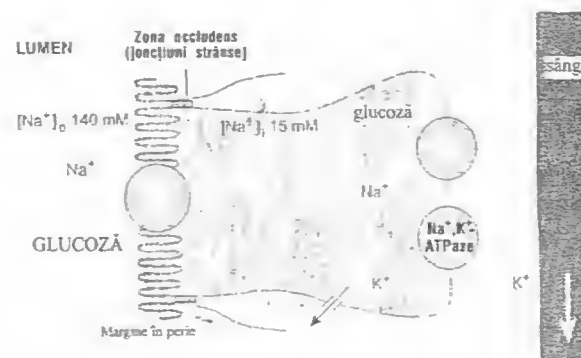


Fig. 2.26. Absorbția intestinală a glucozei (după Pecock și Richards).

Un exemplu de transport activ secundar pentru ioni suficient de frecvent întâlnit îl oferă ionul de calciu. Este cunoscut faptul că foarte multe celule posedă în membranele lor ATPază de Ca²⁺ care asigură extruzia din citosol a ionului de calciu prin transport activ primar. Transportul transmembranar al ionului de calciu se realizează prin numeroase membrane și prin mecanism activ secundar datorită prezenței unei proteine care asigură contratransportul ionilor de sodiu și, respectiv, de calciu. Această proteină utilizează deplasarea ionilor de sodiu în celulă în virtutea gradientului de concentrație pentru a pompa ionul de calciu din citosol în afara celulei prin mecanism activ secundar (fig. 2.27).

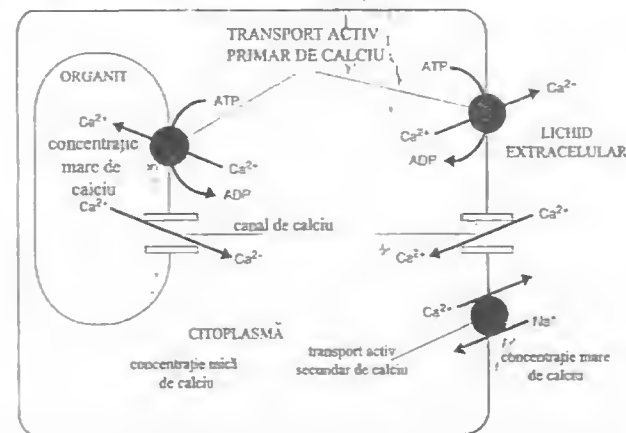


Fig. 2.27. Schema simplificată a principalelor fluxuri celulare de calciu (după Vander și colab.).

2.3.3.2. Transportul macromoleculor

Macromoleculele sunt transportate cu totul excepțional direct prin membrană. La organismul uman acest tip de transfer se descrie în cazul membranei reticulului endoplasmatic pentru proteinele sintetizate la nivelul acestei structuri. În marea majoritate a cazurilor, acestea se transportă pe calea veziculelor, fiind posibile următoarele evenimente: endocitoză, exocitoză și transcitoză.

Endocitoză constă în transportul unor substanțe din mediul extracelular în interiorul celulei cu ajutorul unor vezicule formate din membrana celulară. În funcție de natura substanței transportate, endocitoza se prezintă sub formă de:

- **fagocitoză** – proces prezent în toată scara animală, la om, cu importanță deosebită în procesele de apărare nespecifică dar și în îndepărtarea celulelor îmbătrânite. Constă în introducerea pe calea veziculelor a unor particule din mediul extracelular în celulă;
- **pinocitoză** – constă în introducerea pe calea veziculelor în interiorul celulei de conținut lichid (pinein = a bea) din mediul extracelular. Pinocitoza se poate realiza independent de receptori și mediată de receptori.

Exocitoza reprezintă procesul prin intermediul căruia se produce fuziunea unor vezicule din citoplasmă cu membrana celulară urmată de expulzarea conținutului veziculei în afara celulei. Se descriu procese de exocitoză în cazul celulelor secretoare și la nivelul butonului terminal în cazul transmiterii sinaptice (fig. 2.28).

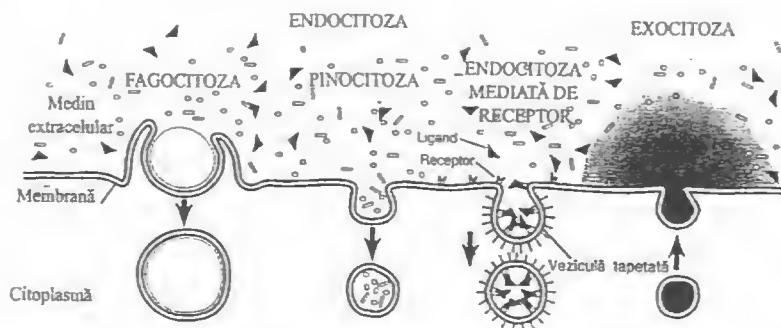


Fig. 2.28. Modalități de macrotransfer de substanță prin membrana celulară (după Pacock și Richards).

Transcitoză este procesul de transport al unor substanțe pe calea veziculelor care, formate la nivelul polului apical sau bazal al celulei, traversează ca atare citoplasma și deversează conținutul la polul opus al celulei. Acest proces este mai activ la nivelul celulelor endoteliale din structura capilarelor sanguine.

2.3.3.3. Transportul prin membrane și permeabilitatea membranaară

În funcție de posibilitățile de traversare a membranelor de către anumiți solviți sau solvenți, se diferențiază gradul de permeabilitate al acestora. Astfel, așa-numitele membrane ideale sunt permeabile pentru apă și impermeabile pentru substanțele solvite. Membrana celulară izolată este permeabilă pentru: apă, electroliți, cristaloi și este impermeabilă pentru macromolecule, ea comportându-se ca o „sită moleculară”. Permeabilitatea selectivă a membranei celulare face ca distribuția ionică la starea de echilibru să fie asimetrică, realizându-se așa-numitul „echilibru Donnan”.

Elaborat teoretic de către Gibbs și confirmat experimental de către Donnan, echilibrul ionic care se stabilește de o parte și de alta a unei membrane cu permeabilitate selectivă în cazul în care în unul din compartimente se găsește un macroanion nedifuzibil realizează distribuția asimetrică a ionilor liberi difuzibili. Deci, dacă membrana „M” cu permeabilitate selectivă separă compartimentul „a”, în care se găsește o soluție de KCl ($\text{Cl}^- + \text{K}^+$), de compartimentul „b”, cu soluție de KCl ($\text{Cl}^- + \text{K}^+$) și o sare de potasiu a unui macroanion ($\text{K}^+ + \text{X}^-$) nedifuzibil, ionii difuzibili vor traversa membrana până se ajunge la starea de echilibru (fig. 2.29).

Se știe că la echilibru:

- fiecare soluție trebuie să fie electric neutră, adică suma anionilor dintr-un compartiment să fie egală cu suma cationilor din același compartiment;

- produsul ionilor (anioni și cationi) difuzibili dintr-un compartiment este egal cu produsul ionilor difuzibili din cel de-al doilea compartiment separat de membrană.

Deci, în condițiile în care în unul din compartimente există un anion nedifuzibil, după realizarea stării de echilibru în acest compartiment concentrația cationului difuzibil va fi mai mare decât concentrația cationului din celălalt compartiment, iar concentrația anionului difuzibil va fi mai mare în compartimentul în care nu există anion nedifuzibil. Această stare este cunoscută sub numele de „echilibru Gibbs-Donnan” și exprimă faptul că prezența unuia sau mai multor anioni nedifuzibili într-unul din cele două compartimente separate de o membrană cu permeabilitate selectivă realizează la echilibru o distribuție asimetrică a ionilor difuzibili.

Asfel, la echilibru:

- starea de neutralitate este reprezentată:

$$\begin{aligned} \text{K}^+ &= \text{Cl}^- \\ \text{K}^+ &= \text{Cl}^- + \text{M}^- \end{aligned}$$

- iar produsul ionilor difuzibili dintr-un compartiment este egal cu produsul ionilor difuzibili din cel de-al doilea compartiment:

$$\text{K}^+ \times \text{Cl}^- = \text{K}^+ \times \text{Cl}^-$$

Deci, $\text{K}^+ > \text{Cl}^-$ și, ca urmare:

$$\text{K}^+ > \text{K}^+ \text{ și } \text{Cl}^- < \text{Cl}^-$$

Efectul Gibbs-Donnan este rezultatul, pe de o parte, al permeabilității particulare a membranei iar, pe de altă parte, al transportului pasiv. Acest efect poate fi amplificat (crescut) sau diminuat (scăzut) de către procesele de transport activ care pot să mențină concentrația constantă intracelulară a oricărei specii ionice, chiar dacă el este și nedifuzibil. Celulele vii conțin o mare cantitate de anioni, în mod deosebit fosfați organici și proteine. Prezența acestor anioni în interiorul celulei antrenează următoarele efecte.

Distribuția anionilor și cationilor difuzibili între celulă și mediul extracelular este inegală (asimetrică), chiar în absența fenomenelor de transport activ. De altfel această distribuție inegală a ionilor de o parte și de alta a membranei conform echilibrului Gibbs-Donnan este unul din factorii care participă la realizarea permanentă a diferenței de potențial electric.

Concentrația cationilor este mai mare în interiorul decât în afara celulei. Situația este ceva mai complicată, întrucât procesele de transport activ introduc K^+ în celulă și expulzează Na^+ , în schimb concentrația H^+ este ceva mai mare în celulă decât în mediul extracelular, de aceea pH-ul intrahemetic, spre exemplu, este ceva mai mic (7,2) decât al plasmiei (7,4).

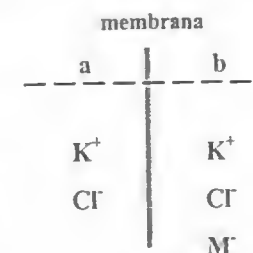


Fig. 2.29. Reprezentare grafică a distribuției ionilor între medii cu compoziție diferită separate de o membrană semipermeabilă.

Concentrația anionilor difuzibili este mai mică în celulă decât în mediul extracelular, raportul cilor intracelular/cilor extracelular fiind subunitar.

Celulele animale au în mod permanent tendința de a-și mări volumul datorită consecințelor osmotice generate de concentrația intracelulară mai ridicată decât a mediului extracelular. Acestei tendințe i se opun procesele de transport activ al cationilor, de aceea, atunci când metabolismul celulei este deprimat în mod natural sau artificial (răcire, intoxicație etc.), datorită perturbării proceselor de transport activ, efectele echilibrului Donnan și, deci, efectele osmotice consecutive determină turgescența celulei însoțită de perturbări funcționale și, în ultimă instanță, moartea celulei prin degradarea membranei celulare.

2.3.3.4. Modalități morfologice și funcționale de comunicare intercelulară

Fiecare celulă din organismul uman este diferențiată pentru a îndeplini un rol specific în organism. Pentru ca aceste unități morfologice și funcționale (celulele) să poată contribui la realizarea confortului biologic și social al organismului din care fac parte, ele trebuie să-și coordoneze activitatea, contribuind la orchestrarea funcțională a acestuia. Coordonarea activității fiecărei celule din organism este posibilă numai în condițiile în care acestea pot primi și transmite mesaje de la și, respectiv, la alte celule. Deci, comunicarea intercelulară este esențială pentru controlul și coordonarea activității tuturor celulelor, țesuturilor și organelor din organism în scopul menținerii homeostaziei organismului.

În organismul uman s-au diferențiat câteva posibilități majore prin care informația poate fi transmisă de la o celulă la alta:

- anumite substanțe exogene sau endogene;
- contact direct între citoplasma celulelor vecine prin intermediul joncțiunilor „gap”;
- contact direct între membranele celulelor adiacente;
- prin intermediul unor substanțe chimice elaborate de acestea.

Controlul funcțiilor celulare prin semnale extracelulare s-ar putea realiza schematic în următoarele direcții:

- inițierea unor secvențe de procese deja programate, cum ar fi, spre exemplu, demarajul mitozei;
- modificarea amplitudinii și/sau a frecvenței de derulare a unui fenomen ciclic care se desfășoară spontan – activitatea cardiacă, a centrilor respiratori etc.;

- inițierea răspunsului celular. În aceste circumstanțe, răspunsul celular se desfășoară atât timp cât acționează semnalul extracelular și încetează când acesta dispare.

Comunicarea intercelulară prin intermediul joncțiunilor „gap”. În unele țesuturi, celulele comunică direct unele cu altele datorită unor diferențieri membranare numite „joncțiuni gap”, la nivelul cărora proteine specifice, „conexine”, realizează adevărate canale intercelulare (fig. 2.30). Conexina se dispune în membrana celulară într-o manieră particulară, formând o structură numită „conexon”. Conexonul este alcătuit

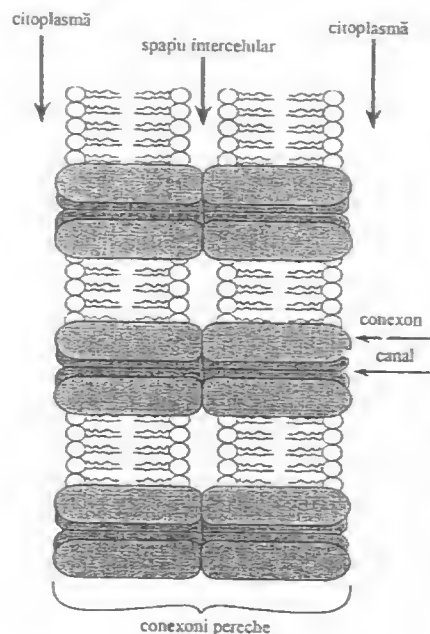


Fig. 2.30. Arhitectura joncțiunilor comunicate (după Rhoades și Tanner).

din șase molecule de conexină și formează o jumătate de canal. Prin unirea la unul din capete a doi conexoni se generează un canal intercelular între cele două celule adiacente.

Joncțiunile de tip gap sunt funcționale numai în condiții fiziologice. De obicei, atunci când una dintre celulele care prezintă joncțiuni gap cu alte celule adiacente prezintă perturbări funcționale, aceste joncțiuni se închid pentru a izola celula afectată de celulele vecine. Aceste canale intercelulare se închid în circumstanțele menționate ca urmare a creșterii concentrației calciului din citosol sau a scăderii pH-ului din celulele afectate.

Joncțiunile de tip „gap” intervin în fiziologia celulelor în care sunt prezente în diverse moduri:

- facilitează fluxuri directe de ioni și chiar de molecule mici între celulele adiacente;
- ca urmare a fluxurilor ionice generate în timpul activării unor celule, semnalul electric este transmis de celula excitată la celulele vecine, așa cum se petrece în miocard, celulele musculare netede și chiar unii neuroni;

- pot cupla funcțional celulele în țesuturile epiteliale unde acestea sunt prezente;
- este posibil ca acest tip de joncțiuni să fie implicat în controlul creșterii și diferențierii celulelor adiacente ca urmare a generării unui mediu intracelular comun.

2.3.3.5. Transportul micromolecular pasiv. Canale ionice

Caracterul hidrofob al matricei lipidice membranare ridică problema modului în care aceasta poate fi traversată de apă și substanțele hidrosolubile fără consum de energie. Există trei categorii de structuri membranare cu rol în transportul pasiv al moleculelor hidrosolubile: canalele ionice, transportorii și ionofoori.

Canalele ionice: unele proteine integrale din structura membranei pot crea căi hidrofile omogene care traversează membrana ca un tunel, asigurând traiectul ușor necesar difuziunii pasive a unor molecule simple sau ioni. Deși până în prezent suntem încă departe de a fi obținut o descriere completă a canalelor ionice membranare sau măcar o identificare a principalelor tipuri, cel puțin câteva specii de canale sunt destul de bine cunoscute, mergându-se până la izolarea proteinei din care sunt formate. Este vorba de canalele de Na⁺, K⁺ și unele canale de Ca²⁺. Identificarea și izolarea lor au fost posibile cu ajutorul unor tehnici de microelectro-fiziologie intracelulară, care permit separarea și analiza fluctuațiilor de curent transmembranar determinate de fluxurile ionice specifice transmembranare. Cea mai recentă dintre aceste metode („patch-clamp”) permite determinarea fluctuațiilor de curent dintr-un fragment de membrană conținând un număr limitat de canale (chiar unul singur). Acest fragment este inserat într-un microelectrod de construcție specială, care permite înregistrarea dinamică a fluxurilor ionice printr-un singur canal membranar. Cercetarea canalelor ionice a devenit posibilă și datorită descoperirii unor inhibitori capabili să se lege specific de proteinele membranare ce constituie diverse specii de canale. Astfel, tetrodo-toxina (TTX) și saxitoxina (STX) se fixează specific pe canalele de Na⁺, blocând fluxurile transmembranare ale acestui ion. Tetraetilamoniu (TEA) și 4-aminopiridina (4-AP) blochează specific canalele de K⁺. Anestezicele locale, de tipul procainei, se fixează specific pe canalele de Na⁺. Cu ajutorul acestor liganzi specifici s-a ajuns la izolarea proteinei-canal care, reinserată în membrane artificiale, își păstrează caracteristicile funcționale.

Izolarea și purificarea unor proteine-canal, precum și clonarea lor ulterioară au dus la o mai bună înțelegere a structurii și, evident, a funcționării acestor molecule. Se știe astăzi că aceste proteine sunt organizate subunitar, având domenii multiple: hidrofobe, hidrofile și amfipatice. Domeniile hidrofobe traversează membrana și sunt în general constituite din 22 de aminoacizi. Ele sunt grupate astfel încât formează structuri cilindrice ce delimitează lumenul hidrofil al canalului. Domeniile hidrofile se plasează atât în interiorul cilindrului ce traversează membrana, cât și la cele două extremități – internă și externă. Au situsuri multiple, ce le permit să interacționeze cu diverși agenți chimici capabili să le modifice activitatea. Aceste posibilități sunt amplificate prin relațiile stabilite cu glicocălixul și citoscheletul membranar. Domeniile amfipatice, având două fețe, una hidrofobă și alta hidrofilă, traversează membrana, contribuind la structura porului cu exterior hidrofob și interior hidrofil.

Din punct de vedere funcțional, canalele ionice se caracterizează prin selectivitate și permeabilitate. Selectivitatea canalului ionic, capabil să permită doar trecerea unei sau unor anumite specii ionice, se

datorează existenței unei anumite configurații moleculare, a unei așa-zise „bariere de selectivitate”. Această, prin dimensiunile, forma și sarcina sa electrică, împiedică migrarea unor specii ionice în favoarea altora.

Permeabilitatea canalului, capacitatea de a asigura un anumit flux ionic, este condiționată de existența unei configurații moleculare tranzitorii cu rol de barieră („gating mechanism”). Datorită acestor configurații, canalele nu sunt deschise permanent, ci trec printr-o serie de tranziții închis/deschis. Frecvența și durata deschiderii canalelor sunt controlate de numeroși factori. În funcție de natura acestor factori, se descriu:

a) Canale voltaj-dependente, în structura cărora intră un așa-zis senzor de voltaj care, la atingerea unei anumite diferențe de potențial transmembranar, devine sediul deplasării unor sarcini intracanalulare și al reorientării unor dipoli ce duc la deschiderea canalului.

b) Canale chimic-dependente, care se deschid în prezența anumitor substanțe endo- sau exogene.

c) Canale chimic-dependente receptor-operate, în a căror structură intră configurații stabile, receptori specifici pentru anumiți agenți chimici cu care se cuplează, modificând tranzitori permeabilitatea canalului.

d) Canale mecano-activate, care, sub influența unor factori mecanici (întindere, presiune), trec prin tranziții conformaționale ce le deschid.

e) Canale cu deschidere spontană, în care factorii ce determină tranziția nu sunt cunoscuți.

Pentru o mai bună înțelegere a particularităților structural-funcționale generale ale canalelor ionice, este utilă o trecere în revistă a datelor acumulate până în prezent cu privire la unele tipuri de canale mai bine cunoscute astăzi, cum ar fi canalele voltaj-dependente de Na^+ , K^+ și Ca^{2+} .

Canalele de Na^+ voltaj-dependente au fost izolate și aprofundat descrise în membranele neuronale, ale mușchiului scheletic și în organelle electrice de către Torpedo. Structural, ele reprezintă un complex hetero-trimeric format din trei subunități: alfa (260 kDa), beta₁ (36 kDa) și beta₂ (33 kDa) (fig. 2.31 A). Canalul de Na^+ propriu-zis intră în structura subunității alfa. Aceasta este constituită din patru domenii similare (I-IV), având fiecare câte șase segmente transmembranare legate prin lanțuri hidrofile la exterior și la interior (fig. 2.31 B). Per ansamblu, se constituie o structură elongată, care traversează membrana de șase ori pentru fiecare domeniu. Dintre cele șase segmente transmembranare, cinci sunt hidrofobe și al șaselea conține la fiecare trei aminoacizi hidrofobi un aminoacid bazic hidrofil, menținut cu consum de forță în interiorul mediului lipidic membranar. Se consideră că acest segment (S₆)

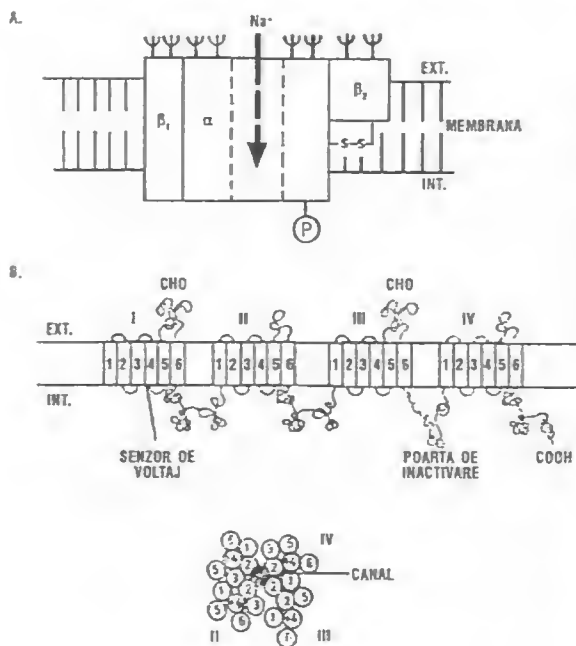


Fig. 2.31. Structura canalului de Na^+ voltaj-dependent (redesenat parțial și modificat după Berne și Levy, 1992). A: Topologia subunității alfa a proteinei-canal. B: Structură transmembranară a subunității alfa, văzută paralel desfășurată și perpendicular (C) față de planul membranei. Cele patru subunități omoloage (I-IV) sunt formate fiecare din câte șase segmente transmembranare (S₁₋₆) legate în serie prin lanțuri peptidice hidrofile, de dimensiuni variabile. Canalul este situat în centrul celor patru cilindri (I-IV) reușiți, poziția segmentelor fiind indicată prin cifre.

joacă rolul senzorului de voltaj. Domeniul III este legat de domeniul IV printr-un lanț peptidic hidrofil de lungime mai mare, care ar constitui așa-zisa „poartă de inactivare” a canalului. Cele patru domenii se dispun sub forma a patru cilindri transmembranari, care delimitează central canalul de Na^+ (fig. 2.31 C). Structura are o formă cilindrică, cu lungimea de 17 nm și diametrul de 4,1 nm. Densitatea acestor canale, chiar în membranele excitabile, nu depășește cifra de 100/μm², fiind în general de 10 ori mai redusă decât cea a canalelor de K^+ din aceleași structuri. Filtrul de selectivitate al acestor canale este reprezentat de zona de constricție plasată în 1/4 externă și delimitată de un inel de oxigeni carbonilici electronegativi (resping anionii și atrag cationii), cu un diametru de 0,3 × 0,5 nm.

La extremitățile externă și internă, canalul prezintă dilatații. Structura dilatației externe permite fixarea moleculelor de tetrodotoxină sau saxitoxină, în timp ce dilatația internă este capabilă să recunoască și să fixeze moleculele de procaină și derivați, având efect blocant specific. Pe acest efect se bazează utilizarea procainei ca anestezic local ce întrerupe propagarea potențialului de acțiune în fibrele nervoase senzitive.

Spre deosebire de filtrul de selectivitate, substratul molecular al barierei de permeabilitate în cazul canalului de Na^+ voltaj-dependent nu este decât parțial elucidat. Studiile electro-fiziologice efectuate de Hodgkin și Huxley au demonstrat faptul că în structura canalului trebuie să existe două bariere de permeabilitate (fig. 2.32). Bariera *m*, închisă în condiții de repaus, se deschide rapid în momentul când s-a atins o depolarizare de 10-15 mV (deplasare de la -80 mV, la -65 mV). În acest moment, canalul deschis lasă să treacă un curent de Na^+ spre interiorul celulei. A doua barieră, *h*, este deschisă în repaus și se închide lent în momentul depolarizării, inactivând după un scurt interval (1 ms) curentul de Na^+ rezultat în urma deschiderii barierei precedente. Ulterior, canalul în stare inactivă (cu bariera *m* deschisă și *h* închisă) trebuie să treacă în starea de repaus (cu bariera *m* închisă și *h* deschisă). Această revenire este posibilă abia după cca 6 ms. Mecanismul acestor modificări tranzitorii de structură moleculară pare a fi explicat prin existența unor fluxuri de sarcini electronegative (electroni - *e*⁻) în interiorul proteinei-canal. În condiții de repaus, câmpul electric generat de potențialul transmembranar de repaus menține o anumită distribuție caracteristică a *e*⁻, care determină o configurație de repaus relativ stabilă a moleculei-canal. În momentul în care, sub acțiunea unui stimul, se produce transformarea limitată a membranei și un influx inițial de cationi, apare în acea zonă o depolarizare limitată. Când această depolarizare depășește pragul menționat (-10, -15 mV), modificarea de sarcină la suprafața membranei este suficientă pentru a determina o redistribuire a electronilor în interior. Acest flux de *e*⁻ spre interior are drept consecință reorientarea barierelor menționate. Acest flux de *e*⁻ spre interiorul canalului a putut fi înregistrat în condiții de *voltage clamp*. După aplicarea stimulului,

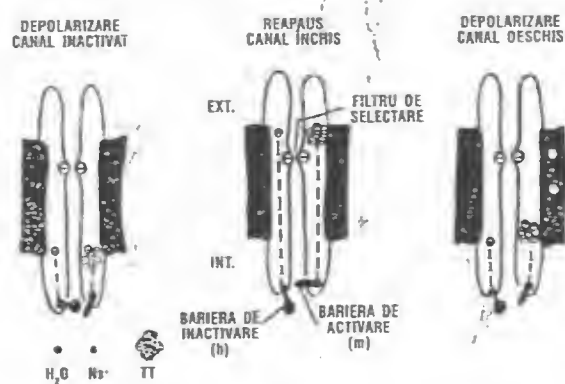


Fig. 2.32. Reprezentare schematică a structurii ipotetice a canalului de Na^+ voltaj-dependent.

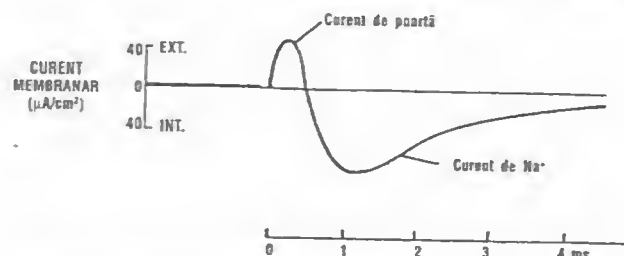


Fig. 2.33. Înregistrarea curentului de poartă ce precedă influxul de Na^+ prin canalul activat.

se observă un curent de amplitudine redusă și dirijat în sens opus curentului amplu generat de influxul de Na^+ prin canalul deschis ulterior. Această manifestare electrică a fost descrisă sub denumirea de *gating current* (curent de poartă) (fig. 2.33).

Reunind datele prezentate, trebuie subliniate totodată și câteva aspecte generale privind modul de funcționare al canalelor de Na^+ voltaj-dependente. Fiecare canal, odată activat, rămâne deschis un anumit interval fix de timp (constantă de inactivare). Amploarea influxului de ioni va depinde întotdeauna de numărul canalelor deschise simultan, fiecare specie de canal având o conductanță specifică (g = flux ionic/unitate de timp/canal). În general, depolarizarea membranei scade pragul de deschidere (hiperexcitabilitate), iar hiperpolarizarea crește acest prag (excitabilitate scăzută).

Canalele de K^+ voltaj-dependente, spre deosebire de cele de Na^+ , detaliat descrise mai sus, prezintă o singură barieră de permeabilitate (n), ce se deschide tardiv, la cca 6 ms după stimularea. În acest moment, canalele de Na^+ activate de același stimul sunt deja în stare inactivă.

Odată aflate în tranziție deschisă, canalele de K^+ joacă rolul unei căi hidrice pasive, prin care, sub influența gradientului de concentrație, se realizează un eflux de K^+ transportând un curent ionic dirijat în sens contrar curentului de Na^+ prin canalele specifice menționate anterior. Acest curent are, prin urmare, un sens repolarizant, mărind diferența de potențial transmembranar. Excesul de K^+ extracelular se opune acestui curent, având un efect depolarizant excitator.

Canalele de Ca^{2+} voltaj-dependente controlează o bună parte dintre fluxurile transmembranare de Ca^{2+} , cu implicații deosebite în declanșarea și modularea unei game largi de activități celulare. Proteina-canal este formată din cinci subunități polipeptidice și glicopeptidice: alfa, (175 kDa; dihidropiridin-sensibilă), alfa₂ (143 kDa), beta (54 kDa), gamma (30 kDa), delta (27 kDa) (fig. 2. 34). Subunitatea alfa, ar conține canalul și situsurile de fosforilare modulatorie intracelulare. Subunitatea beta este localizată pe fața internă a complexului și conține al doilea situs de fosforilare modulator, în timp ce subunitatea delta este localizată exclusiv în zona externă. S-au descris numeroase tipuri și subtipuri cu caracteristici și localizări diferite. Canalele Ic pot fi blocate de Co, Mn, Cd. Canalele tip L, dihidropiridin-sensibile, au un prag ridicat de activare, dar și durată mare de activitate. Canalele de tip N au un prag redus și o durată scăzută de activitate. S-a descris și o specie I_{sc} (stretch activated) etc.

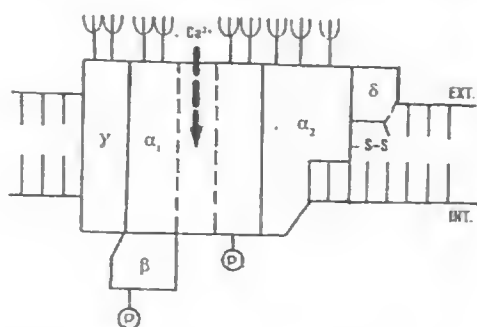


Fig. 2.34. Arhitectura moleculară a canalului de Ca^{2+} (vezi text).

Transportorii sunt structuri proteice membranare – proteine integrale – cu zone

hidrofobe incluse în stratul lipidic membranar, capabile să mărească, considerabil, viteza de transport a micromoleculelor solvite de pe o față a membranei pe cealaltă. Viteza de transport este mult mai mare decât cea realizată prin difuziunea transmembranară simplă, care, pentru substanțe strict hidrosolubile, poate ajunge la valori aproape de 0. În ceea ce privește capacitatea de transport, transportorii ocupă o poziție intermediară între transportul activ cu ATPaze și capacitatea de transport a canalelor ionice, care este mult mai mare (tabelul 2.1).

TABELUL 2.1

Capacitatea maximă de transport a diferitelor tipuri de proteine implicate în schimburile transmembranare (modificat după Best și Taylor, 1992)

Tipul de structură transportoare	Proteina	Moleculă transportată	Molecule/s
Pompă	Na^+, K^+ -ATPaza	Na^+	5×10^2
	Ca^{2+} -ATPaza	Ca^{2+}	2×10^2
Transportor	Banda 3	Cl^-	5×10^4
	Transportorul de glucoză	Glucoză	1×10^4
Canal	Na^+	Na^+	1×10^7
	Gramicidină	Cl^-	2×10^8

Prin proprietățile lor, transportorii ocupă, de asemenea, un loc intermediar între ATPazele de transport activ și canalele ionice, prezentând asemănări, dar și deosebiri față de ambele sisteme membranare. Transportorii contribuie atât la transportul pasiv (difuziune facilitată, contratransport), cât și la forme de transport activ enzimatic (transport activ primar sau secundar, numit și cotransport electrogen). Caracteristicile principale ale transportorilor, așa cum se regăsesc în forma cea mai completă în cazul transporturilor de glucoză, ar fi următoarele: (1) fluxul realizat într-un anumit gradient de concentrație al moleculei transportate este mult mai mare decât cel estimat a se realiza prin difuziune simplă în funcție de solubilitatea compusului în membrană; (2) fluxul nu variază liniar cu gradientul de concentrație, prezentând o cinetică de saturație de tip enzimatic (nu se respectă legea lui Fick); (3) transportul poate fi blocat cu inhibitori competițivi (analogi structurali); (4) adăugarea de substrat pe fața opusă accelerează fluxul spre acea față; (5) ca și enzimele de transport activ, transportorii suferă modificări de configurație în momentul fixării moleculei specifice. Au existat controverse îndelungate cu privire la mecanismul prin care se realizează transconformările și transportul aferent. Posibilitățile au inclus: (1) mecanismul de „flip-flop”, în care molecula transportoare, după ce a fixat molecula transportată pe una

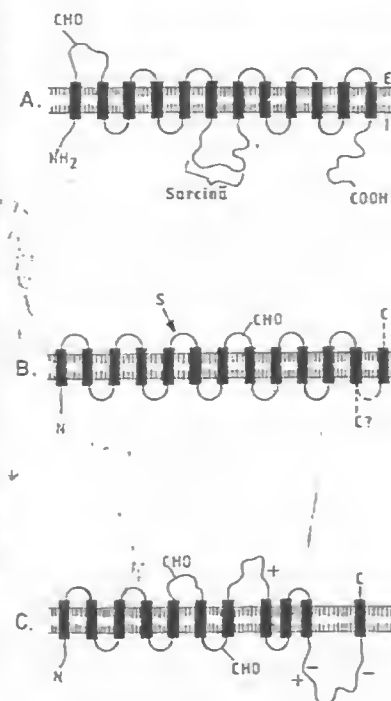


Fig. 2.35. Modele de proteine transportoare transmembranare (modificat după Best-Taylor, 1992). A: Transportorul de glucoză eritrocitar (se observă cele 12 domenii transmembranare). B: Proteina „benzii 3” eritrocitare. C: Cotransportorul Na^+ /glucoză.

dintre fețe, suferă o întoarcere de 180° și, ca o ușă turnantă, aduce și descarcă molecula pe partea opusă a membranei; (2) mecanismul de „ferry boat”, prin care transportorul, după ce a fixat solvitul pe una dintre fețele membranei difuzează spre fața opusă, unde descarcă substanța transportată; (3) mecanismul de „squirting”, în care transportorul formează o structură relativ rigidă transmembranară. După ce a fixat substanța de transportat la una dintre extremități, transportorul suferă mici transconformări succesive, care propulsează substanța de transportat în fâșnături succesive („squirts”) spre fața opusă, unde este descărcat. Acest ultim mecanism, care face din transportor un adevărat canal specific, cu o structură imperfectă și capacitate de transport mai redusă, este astăzi unanim acceptat. Un număr important de proteine transportoare au fost izolate, purificate și, după obținerea de ADN recombinat clonat, secvențate cu precizie. Figura 2.35 A, B, C prezintă modelele de structură moleculară pentru trei transportori mai bine cunoscuți: (A) transportorul de glucoză din membrana hematocit, ca reprezentant tipic de transportor unidirecțional implicat în difuziunea facilitată; (B) proteina „benzii 3” hematocit, ca reprezentant al transportorilor implicați în fenomenul de cotransport sau difuziune de schimb cu transportor; (C) cotransportorul eritrocitar de Na⁺/glucoză, care fixează și transportă simultan doi solviți, fiind implicat în mecanismele de cotransport electrogen (transport activ secundar) sau în unele forme de cotransport electroneutral.

Transportul pasiv are ca bază fenomene de osmoză și difuziune guvernate de gradientele electrice, ionice, de concentrație etc.

Osmoza. Deplasarea transmembranară a moleculelor de apă se realizează prin fenomenul de osmoză.

În cazul a două soluții separate printr-o membrană semipermeabilă, moleculele de solvent (apă) se vor deplasa din compartimentul cu concentrație mică spre compartimentul cu concentrație mare. În soluțiile cu concentrație mai redusă, moleculele de solvent, fiind mai puțin obstrucționate de solvit, au o agitație moleculară mai mare, trecând în zona de concentrație crescută. Presiunea osmotică efectivă a unei soluții este acea presiune care, aplicată soluției respective, împiedică orice deplasare a moleculelor de solvent. Sensul și viteza de deplasare a solventului între două soluții sunt date de diferența de presiune osmotică.

Presiunea osmotică este direct proporțională cu temperatura mediului, cu numărul de particule rezultate din disocierea solventului și invers proporțională cu volumul, conform relației:

$$P = \frac{n \times RT}{V}$$

în care: P = presiunea osmotică; n = numărul de particule solvite; R = constanta universală a gazelor; T = temperatura absolută; V = volumul.

Cum în organism T este constantă, rezultă că presiunea osmotică va fi proporțională cu numărul de particule din soluție pe unitatea de volum.

Apa traversează rapid membrana prin soluții de continuitate (canale), legate probabil de unele proteine incluse în stratul bilipidic. Aceste canale pot avea fie diametre foarte reduse, fie diametre mai mari, dar cu o stare de organizare a apei ce exclude solvenții.

O altă posibilitate a apei de traversare este reprezentată de difuziunea simplă, individuală și independentă de orice solvit, prin care fiecare moleculă de apă penetrează faza lipidică membranară.

Difuziunea simplă: viteza cu care o particulă poate difuza prin membrana celulară (viteza de difuziune = Ps) este invers proporțională cu grosimea membranei (m) și direct proporțională cu coeficientul de difuziune al substanței respective (Ds):

$$P_s = \frac{D_s}{m}$$

La rândul său, coeficientul de difuziune este direct proporțional cu: temperatura (t°), solubilitatea substanței în mediile traversate, greutatea moleculară, configurația spațială a moleculei (moleculele asimetrice se deplasează cu dificultate), natura substanței și numărul de legături cu mediul pășit, starea de hidratare etc.

Intervenția gradului de solubilitate (hidrofilie, lipofilie) a substanței ce traversează membrana este exprimată de valoarea coeficientului de partaj (K), reprezentat de raportul la echilibru dintre concentrațiile unei substanțe în doi solvenți nemiscibili aflați în contact:

$$K = \frac{C_1}{C_2}$$

Unele narcotice liposolubile pătrund cu ușurință în celule datorită coeficientului de partaj favorabil traversării membranei.

Difuziunea simplă se realizează datorită unor gradientele fizice de concentrație sau electrice. Inegalitatea de concentrație între două compartimente (C₁ și C₂) generează o energie de concentrație (E_c) conform relației:

$$E_c = RT_m \ln \frac{C_1}{C_2}$$

Această energie propulsează moleculele de solvit dinspre compartimentul cu concentrație mare spre cel cu concentrație joasă.

În mod similar, gradientul electric (diferența de potențial determinată de repartitia inegală a unor particule încărcate = E_e) generează o energie electrică (E_e) conform relației:

$$E_e = ZF E_m$$

în care Z = numărul atomic și F = numărul lui Faraday (96 500 coulombi).

Cele două energii sumate (E_c + E_e) reprezintă o energie potențială, denumită potențial electrochimic al substanței respective. La echilibru, potențialele electrochimice ale celor două compartimente (intra- și extracelular) sunt egale. Această relație creează posibilitatea realizării echilibrului în condițiile unei diferențe de concentrație compensate corespunzător de o diferență de potențial (vezi în continuare).

Difuziunea facilitată este o formă de transport pasiv care, utilizând transportori specifici, beneficiază de o viteză de transfer transmembranară mult crescută față de difuziunea simplă, în care coeficientul de partaj al substanțelor hidrosolubile separate este nefavorabil. Prezența unor transportori specifici în structura membranei aduce valorile transportului pasiv unidirecțional în limite funcționale necesare. Cinetica acestui tip de transport este prezentată în figura alăturată (fig. 2.36). Molecula de transportat se fixează pe extremitatea „cis” a proteinei, apoi urmează etapa de transport propriu-zis, în care prin șesuturi repetate se produce deplasarea glucozei din interiorul transportorului spre fața opusă („trans”), unde este eliberată în mediu. În cazul în care concentrația glucozei de pe fața „trans” este redusă, transportorul neîncărcat revine la fața „cis” pentru fixarea unei noi molecule. Modelele acceptate în prezent pentru transportori sugerează existența unei structuri canalulare.

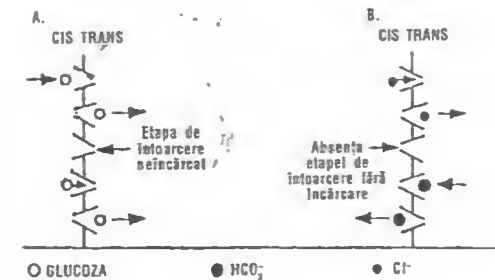


Fig. 2.36. Modelele a două tipuri de transportori (modificat după Best-Taylor, 1992). A: Transportor simplă (eritrocitar pentru glucoză). Transportorul fixează solvitul și îl descarcă pe fața transversală. Revenirea pe fața cis se face cu transportorul neîncărcat. B: Transportor prin schimb (de exemplu: Cl⁻/HCO₃⁻ eritrocitar). Cl⁻ se leagă pe fața cis și este translocat. Întoarcerea se face după fixarea HCO₃⁻. Până la fixarea HCO₃⁻ rămâne descărcat pe fața transversală.

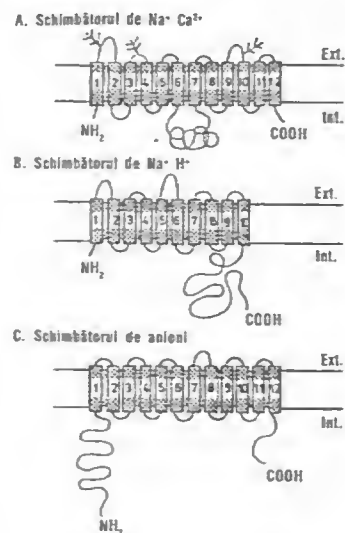


Fig. 2.37. Structura secundară a trei cariere schimbător de ioni (modificat după Berne și Levy, 1992). A: Schimbătorul $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$. B: Schimbătorul Na^+/H^+ . C: Schimbătorul anionic.

celulare. Stoichiometria acestui transportor pentru $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ este de 1:3–5, el fiind probabil și electrogenic (generează diferențe de potențial). În fine, un al treilea transportor cunoscut este schimbătorul electroneutru de Na^+/H^+ . Acest sistem antiport este ubicuitar, contribuind la menținerea pH-ului intracelular cu rol critic în procese cum ar fi: proliferarea și diferențierea celulară și sensibilitatea la hormoni.

Echilibrul Donnan este o formă de difuziune simplă care se produce atunci când de o parte a membranei există un ion impermeant. O astfel de situație apare în cazul celulei a cărei membrană este impermeabilă pentru anionii organici (A^-) de dimensiuni mari (proteine) din interior, dar este permeabilă pentru cationii (K^+) și anionii anorganici (Cl^-). În acest mod, starea de echilibru se va realiza în condițiile unui exces de K^+ pe fața internă (unde se află și A^-) și ale unui exces de Cl^- pe fața externă. Această distribuție se realizează astfel încât raporturile concentrațiilor în cele două medii sunt egale:

$$\frac{K_i}{K_e} = \frac{Cl_i}{Cl_e} \text{ sau } K_i \times Cl_i = K_e \times Cl_e$$

Forțele de difuziune astfel generate sunt compensate pentru fiecare specie ionică prin forțe electromotrice dirijate în sens invers (vezi și datele referitoare la geneza potențialului de repaus).

2.3.3.6. Sisteme de transport activ

Transportul transmembranar al unor substanțe împotriva gradientelor fizice, precum și menținerea unor inegalități de concentrație ionică (de exemplu, pentru sodiu și potasiu) nu pot fi explicate decât dacă se ia în considerare existența unor mecanisme de transport activ („pompe”). Aceste mecanisme, care se

Contratransportul, sau schimbul mediat de transportori, este o alternativă la mecanismul difuziunii facilitate. În dinamica procesului lipsește etapa de revenire a transportorului descărcat de pe fața „trans” pe fața „cis”. Cu alte cuvinte, sunt implicați transportori a căror structură nu se poate modifica reversibil decât în condiții de încălzire (vezi fig. 36 B). Din această categorie fac parte o serie de proteine-transportori, cum ar fi proteina „benzii 3” eritrocitare (schimbătorul de $\text{Cl}^-/\text{CO}_3^-$), schimbătorul de $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ și cel de Na^+/H^+ , pentru a nu vorbi decât despre cele mai cunoscute (fig. 2.37). Izolarea, clonarea și secvențarea acestor proteine transportoare a scos în evidență o serie de caracteristici comune cu alți transportori (vezi fig. 2.35). În cazul proteinei „benzii 3” eritrocitare, studiile efectuate au evidențiat următoarele: (1) în capilare și venule, CO_2 difuzează în interiorul hematiei, unde este convertit de anhidraza carbonică în HCO_3^- , care apoi este schimbat prin contratransport cu Cl^- extrahematic. La nivel pulmonar, întregul proces se inversează, eliberându-se CO_2 , care difuzează spre alveole. (2) Transportul este „electroneutr”, rata obligatorie de schimb $\text{CO}_3\text{H}^-/\text{Cl}^-$ fiind de 1:1. (3) Mecanismul implicat este cel de „însuturi” repetate („squirts”) și este complet pasiv, făcându-se pentru HCO_3^- , în sensul gradientului de concentrație. Nici semnificația funcțională a celorlalți schimbători nu este de neglijat. Schimbătorul de $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ este deosebit de important în membranele neurale și miocardice. El este implicat atât în menținerea unei concentrații scăzute a Ca^{2+} citoplasmatic liber, în condiții de repaus, cât și, în cursul stimulării, la realizarea unor peak-uri de Ca^{2+} importante pentru declanșarea activității

realizează cu consum de energie metabolică, pot interveni fie accelerând deplasarea de-a lungul unui gradient, fie diminuând sau chiar suprimând efectul gradientelor electrochimice.

În funcție de modul în care se realizează și se utilizează energia necesară, transporturile active pot fi de două tipuri: transportul activ primar și transportul activ secundar (cotransportul electrogen).

Transportul activ primar se caracterizează prin faptul că utilizează direct ATP în vederea transportului, care este realizat cu ajutorul unor ATPaze specifice fiecărei specii ionice sau molecule transportate. Este din nou vorba despre structuri moleculare proteice cu zone hidrofobe care traversează membrana. Hidrolizând ATP, aceste structuri eliberează energia necesară unor transconformări generate prin fosforilare. Transconformările mobilizează substratul spre fața opusă a membranei. Aici procesul se inversează prin defosforilare, urmată de trecerea ciclică într-o a doua configurație, aptă să asigure transportul altui substrat în sens invers.

Cea mai bine cunoscută dintre ATPazele de transport este Na^+/K^+ -ATPaza formată dintr-o subunitate „catalitică” – alfa (Mr: 100 000 daltoni) – și o subunitate glicoproteică – beta (Mr: 50 000 daltoni) (fig. 2.38). Operând la capacitate maximă, această Na^+/K^+ -ATPază transportă trei ioni de Na^+ spre exterior și

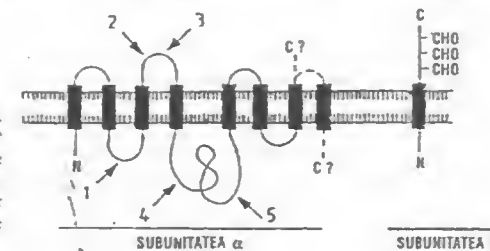


Fig. 2.38. Orientarea intramembranară a Na^+/K^+ -ATPazei. Subunitatea alfa are patru situsuri cu afinitate pentru: Na^+ (1); K^+ (2); ouabaină (3); ATP (5) și un situs de fosforilare (4). Subunitatea are șase-opt segmente transmembranare. Subunitatea beta are un singur segment transmembranar și trei puncte cu potențial de glicozilare (CHO) situate pe extremitatea carboxiternală externă.

doi ioni de K^+ spre interior pentru fiecare moleculă de ATP hidrolizată. Fosforilarea și defosforilarea ciclică a proteinei o determină să oscileze între două conformații alternative (peristaltică moleculară). În configurația E1 situsurile ionice au afinitate mare pentru Na^+ și sunt orientate spre citoplasmă, în timp ce în configurația E2 aceleași situsuri favorizează legarea K^+ și se orientează spre lichidul extracelular. O descriere simplificată a procesului este prezentată în figura alăturată (fig. 2.39). Conformerul E1 are afinitate mare pentru Na^+ intracelular, pentru Mg^{2+} și ATP. Când acești trei liganzi sunt fixați, proteina este fosforilată la nivelul unui reziduu aspartat din apropierea situsului de fixare a ATP. În acest timp, situsul de fixare pentru Na^+ suferă un fenomen de „ocluzie” (devine inaccesibil dinspre ambele fețe ale membranei). Se consideră că în acest moment ATPaza suferă o transformare ce face situsurile ionice accesibile dinspre fața externă a membranei, scăzându-le totodată afinitatea pentru Na^+ . Ca urmare, ionii de Na^+ disociază în mediul extracelular și proteina trece într-o nouă stare conformațională: E2-P. Configurația E2-P are o afinitate crescută pentru K^+ pe fața extracelulară, fixând la acest nivel 2K^+ . Legarea K^+ determină disocierea legăturii acil – fosfat și, din nou, situsurile pentru K^+ trec în forma ocluzată, devenind inaccesibile. Fixarea unei noi molecule de ATP pe E2- K^+ determină trecerea în forma E1 și ionii de K^+ disociază pe fața endoplasmică, procesul repetându-se ritmic (peristaltică moleculară). Deși mecanismele detaliate ale transportului activ primar rămân doar parțial cunoscute, s-au descris până în

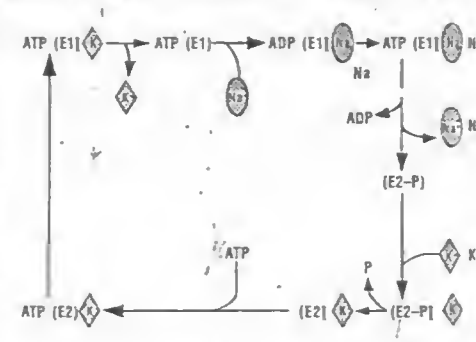


Fig. 2.39. Mecanismul de acțiune a Na^+/K^+ -ATPazei (reprezentare simplificată).

Deplasarea unor componente membranare este adesea legată de starea funcțională a celulei sau a unor compartimente celulare. În această categorie ar putea intra, de exemplu, activitatea transportorilor, închiderea sau deschiderea unor canale specifice, deplasarea laterală și conglomerarea unor proteine receptoare etc. Aceste mișcări sunt controlate biochimic prin variații de fluiditate ale membranei, fosforilări, modificarea (contractia) elementelor citoscheletice. Numeroase protine membranare suferă adevărate cicluri care, începând cu sinteza la nivel de citoplasmă, continuă cu inserția în membrană în vederea îndeplinirii rolului funcțional și/sau structural, urmată de reincluderea în citoplasmă și degradare.

Mișcările membranelor celulare sunt implicate în fenomenele de macrotransfer (endocitoză, exocitoză), fenomenul de efervescență și locomoție celulară.

Din categoria *endocitazei* fac parte: *fagocitoza*, funcție caracteristică leucocitelor și macrofagelor (vezi capitolul respectiv), dar și altor specii celulare; *macropinocitoza*, în care membrana emite o lamă ectoplasmică sau realizează o invaginare tubuliformă ce permite captarea unei picături de lichid; *micropinocitoza*, în care prin invaginarea membranei se realizează un tubul ce prin strangulare formează microvacuole.

Evacuarea unor compuși din celule se realizează prin exocitoză continuă (mai rar) sau discontinuă (indusă de stimuli, mai frecventă). Prin exocitoză se elimină granulele sau veziculele de secreție (celule exo- și endocrine), produșii de catabolism, mediatorul conținut în veziculele sinaptice. Procesul este, de obicei, calciu-dependent.

Mișcările de efervescență constau în emiterea unor proeminențe buloase (\varnothing : 2–10 μ m), care persistă 20–60 s și apar în zonele în care presiunea osmotică intracelulară este scăzută. Se observă, de exemplu, în cursul mitozei.

Mișcările de locomoție se realizează prin pseudopode (vezi capitolul de fiziologie leucocitară) și membrane ondulate (expansiuni) fine sub formă de lame.

2.3.5. COMUNICĂRI INTERCELULARE – ROLUL MEMBRANELOR ÎN TRANSMITEREA INFORMAȚIILOR

Principala condiție a supraviețuirii, dezvoltării și desfășurării funcțiilor vitale ale organismelor pluricelulare este reprezentată de comunicarea intercelulară realizată prin intermediul membranelor plasmatică pe căi directe sau indirecte complexe, cu participarea moleculelor semnal de diferite tipuri și structuri (electro-chimice, neuro-umorale, paracrine, neuroendocrine, imune etc.).

Pentru a comunica între ele și a răspunde moleculelor semnal locale sau de la diferite distanțe, celulele posedă receptori de suprafață sau intracelulari ca traducători de informație, generatori de răspunsuri specifice celulare. Comunicările intercelulare folosesc în majoritatea cazurilor una din următoarele trei căi:

- își structurează moleculele de suprafață ce acționează asupra celulelor alăturate din imediata vecinătate;
- formează joncțiuni speciale de tip *gap* sau *nexus* (perforate), prin care stabilesc relații directe cu ceulele de care sunt atașate;
- secretă substanțe chimice pe care le transmit pentru a acționa ca semnale de transducție la nivelul altor celule.

Prima cale de comunicare între două sau mai multe celule adiacente este reprezentată de participarea moleculelor de cuplaj și adeziune celulară de tipul collagenului, elastinei și fibronectinei formatoare a unei veritabile matrice extracelulare integrate. Cea de a doua cale este constituită din mesagerii chimici și receptori lor specifici extra- și intracelulari.

Cel mai eficient și intim mijloc de comunicare celulară îl asigură însă particularitățile joncționale structurale ale zonelor de contact intercelulare. Acestea sunt de trei tipuri:

1. joncțiuni etanșe impermeabile (*tight junctions*), ale căror proteine de contact intercelular nu permit trecerea de la o celulă la alta. Ele asigură controlul deplasării apei și soluțiilor la nivelul celulelor (epiteliale) care tapetează organele cavitare (tractul gastro-intestinal, tubii uriniferi etc.);

2. joncțiuni de tip aderențial (*adherens*), denumite desmozomi, formate din filamente dense de ancorare intercelulară și îngroșări citoplasmice transmembranare prevăzute cu plăci de keratină. Spre deosebire de *gap junctions*, acestea asigură sudarea intercelulară și creșterea rezistenței la întindere;

3. joncțiuni comunicante (*gap junctions*), ce prezintă mici canale de comunicare între celule sub formă de tuneluri cu diametrul de până la 1,5 nm, ce asigură legături directe și cuplări electro-chimice între celulele adiacente.

Din această categorie a mesagerilor chimici celulari fac parte atât produșii de secreție locală, de tipul factorilor autocoizi (hormoni locali, mediatori chimici, modulatori celulari, etc.), cât și hormoni și neurohormoni circulanți. O imagine de ansamblu a tipurilor de comunicări intercelulare este prezentată în figura 2.42.

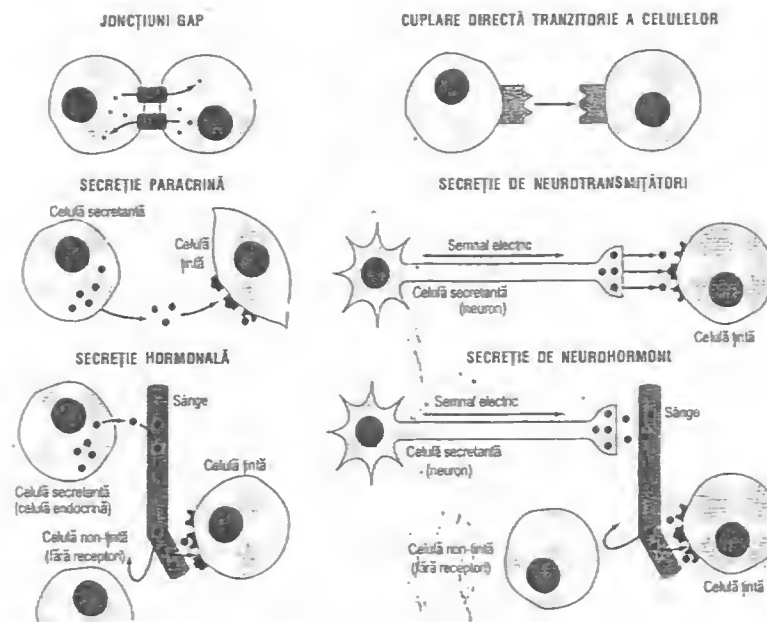


Fig. 2.42. Tipuri de comunicări intercelulare.

În timp ce joncțiunile etanșe, fiind impermeabile, controlează deplasarea apei și a soluțiilor prin organele cavitare (tract gastro-intestinal, tubii uriniferi etc.), joncțiunile perforate (de tip gap sau nexus) asigură cuplarea electro-chimică intercelulară, realizând singurul funcțional al celulelor musculare cardiace, gastro-intestinale etc.

Particularitățile structurale și funcționale ale moleculelor semnal ca mesageri purtători de diverse informații umorale, neurohormonale, imunitare sau modulatorie vor fi expuse la capitolele respective.

2.3.5.1. Mesagerii primari (mesageri I)

Coordonarea activității celulare în vederea unor acțiuni subordonate unui anumit scop adaptativ se realizează, în imensa majoritate a cazurilor, prin intermediul unor semnale chimice. Aceste semnale sunt reprezentate de substanțe care, produse de anumite celule mai mult sau mai puțin specializate, ajung în

mediul extracelular, de unde își exercită acțiunea asupra altor grupuri celulare. Din această categorie de substanțe fac parte: hormonii clasici (hipofizari, tiroidieni etc.), produși de anumite organe endocrine specializate și care, intrând în circulația generală, pot acționa la distanțe mari; neuromediatorii (acetilcolina, noradrenalina, dopamina etc.), care se eliberează la nivelul sinapselor, asigurând local transmiterea influxului nervos; hormonii locali (histamină, plasmakinine, factori de creștere etc.) care, eliberați în numeroase țesuturi, acționează predominant local, asigurând homeostazia sau reacția țesutului și organului respectiv. Această nomenclatură a substanțelor biologice active cu rol regulator extracelular a început în ultimii ani să-și piardă tot mai mult semnificația. Unele substanțe considerate a fi exclusiv hormoni locali s-au dovedit a fi și neuromediatorii importanți (serotonina, histamina). Hormonii clasici s-au demonstrat a avea și roluri specializate de neuro-transmitatori sinaptici (insulina, adrenalina). În numeroase sinapse se eliberează simultan două sau chiar mai multe substanțe active, dintre care unele, pe lângă rolul local, exercită și roluri generale. S-a descris un adevărat sistem endocrin difuz (APUD), format din celule de origine neurală, dispersate practic în tot organismul, capabile să secrete un mare număr de substanțe cu rol în activitatea a numeroase țesuturi și organe (tub digestiv, sistem nervos central și periferic etc.). Datorită acestui fapt, pe măsură ce delimitările se șterg, există astăzi tendința de a reuni aceste substanțe biologice active în noțiunea comună de factori hormonalii sau de hormoni, în sensul general al cuvântului. Ansamblul acestor factori constituie sistemul mesagerilor primari (mesageri I) (fig. 2.43).

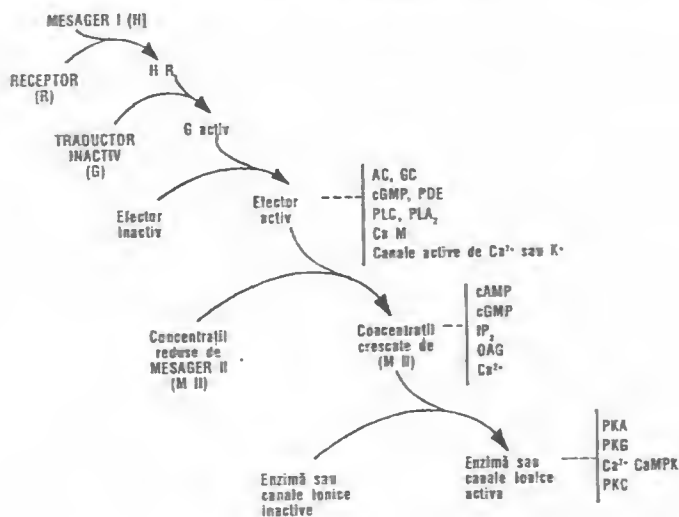


Fig. 2.43. Reprezentare schematică a cascadei de transmitere intracelulară a semnalelor extracelulare (modificat după Berne și Levy, 1992).

2.3.5.2. Receptorii celulari

Mesagerii primari au în comun faptul că, în vederea realizării acțiunii specifice, trebuie să fie recunoscuți și să interacționeze cu receptori specifici din membrana sau interiorul (citoplasmă, nucleu) celulei-țintă. Receptorii celulari sunt agregate macromoleculare (predominant proteice), având proprietatea de a capta, amplifica și modula informația adusă de mesagerul primar cu care se cuplează stereospecific.

Modificarea indusă determină transmiterea mesajului către unele sisteme intracelulare (mesagerii secundari) care determină răspunsul.

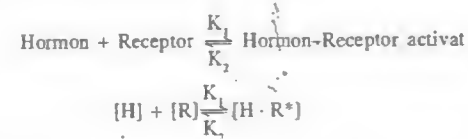
Proteinele-receptor au în structura lor cel puțin două domenii importante: un situs de recunoaștere și legare a mesagerului primar (reacție primară) și un al doilea situs de activitate, prin care receptorul activat determină intrarea în acțiune a lanțului de transmitere a mesajului primit (reacție secundară).

În afara interacțiunii cu receptorii, hormonii se pot lega și de alte substanțe (de obicei, proteine), fără a declanșa reacții secundare. Aceste componente hormon-specifice sunt denumite acceptari și reprezintă factori de degradare sau de transport al hormonilor.

În timp ce în organism liganzii naturali ai receptorilor (agoniști) declanșează atât reacția primară, cât și pe cea secundară, cercetările farmacologice permit sinteza unor substanțe care, deși sunt recunoscute de receptori ca declanșând reacția primară, nu determină reacțiile secundare de răspuns celular. Aceste substanțe, care împiedică accesul agoniștilor la receptori, reprezintă antagoniști competitivi, sau agenți blocați. Între cele două extreme, agoniștii și antagoniștii, există un spectru larg de agoniști și antagoniști parțiali ce declanșează răspunsuri de intensitate scăzută.

Din cele menționate rezultă că în transferul celular de informație se pot distinge o serie de etape ce diferă în funcție de particularitățile structural-funcționale ale sistemului receptor implicat:

a) Reacția mesager I-receptor (reacția primară) constă în recunoașterea și cuplarea stereospecifică a hormonului pe situsul specific de pe receptor. Moleculele de mesageri secundari (H) se comportă ca „efectori allostерици” care, fixându-se pe molecula de „proteină allosterică” ce constituie receptorul (R), nu sunt metabolizați, ci determină o modificare a configurației terțiare și, prin urmare, a funcției la extremitatea distală a moleculei, care este astfel activată. Deși cinetica interacțiunii H-R este complexă, ea poate fi reprezentată în general ca o reacție bimoleculară, reversibilă:



Interacțiunea H-R presupune interacțiuni hidrofobe, punți de H⁺, forțe Van der Waals și punți saline, fiind însă excluse legăturile covalente. Din acest motiv, complexul H·R* se disociază cu ușurință pe măsură ce se formează. Întregul proces poate fi descris ca o asociere-disociere ritmică, cu o constantă

de disociere ($K_d = \frac{K_2}{K_1}$) de 10^{-8} – 10^{-12} mol/l, explicabilă printr-o mare afinitate ce permite recunoașterea de

către receptor a unor concentrații hormonale de ordinul nano- și picogramelor. Situsul de legare de pe receptor demonstrează o mare specificitate și afinitate, care dispar în momentul în care mesagerul primar suferă modificări structurale minime (prezența unei grupări hidroxil pe un hormon steroid sau înlocuirea unui singur aminoacid într-un hormon proteic). Deși fiecare receptor reprezintă o entitate moleculară distinctă, anumite caracteristici comune trebuie subliniate ca atare. Proteinele-receptor prezintă o regiune de recunoaștere și legare a hormonului de obicei expusă la exteriorul celulei, o regiune hidrofobă care ancorează receptorul în stratul lipidic al plasmalemei și, în fine, un situs de activitate care interacționează fie cu alte proteine membranare, fie cu interiorul celulei. Receptorii sunt de obicei glicozilați, prezintă o structură subunitară și necesită fosfolipide sau un mediu intramembranar pentru a avea activitate biologică. S-au identificat două tipuri generale de structură pentru receptorii membranari. Primul tip constă din șapte helixuri hidrofobe care traversează membrana. Buclele superficiale care leagă între ele segmentele transmembranare formează domeniul de fixare a ligandului, în timp ce buclele profunde citoplasmice sunt implicate în cuplarea cu efectorul. Această structură este caracteristică receptorilor rodopsinici, colinergici de tip M, adrenergici de tip alfa și beta și canalelor ionice receptor-controlate (fig. 2.44). Al doilea tip structural este format dintr-un singur domeniu transmembranar, care leagă domeniul extracelular de fixare a mesagerului I de domeniul citoplasmatic ce conține frecvent o activitate enzimatică intrinsecă. Din această

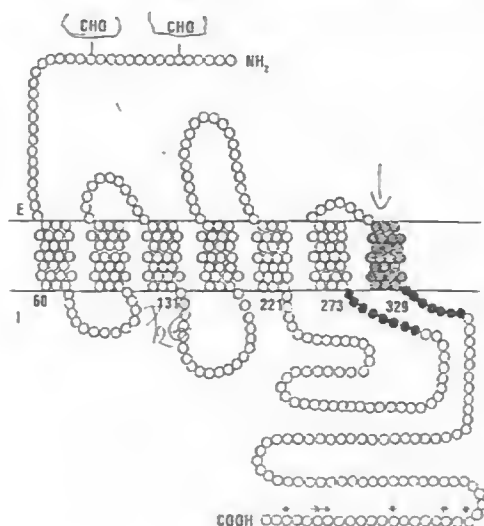


Fig. 2.44. Modelul structural al receptorului beta-adrenergic uman aparținând familiei de receptori cuplați cu proteine G. Dintre caracteristicile comune familiei se pot enumera: extremitatea N-terminală externă, cu multiple situsuri de glicozilare (CHO); 7 alfa-helixuri transmembrănare; o buclă lungă intracelulară conectând segmentele 6 și 7; extremitatea C-terminală internă cu situsuri de fosforilare (serină, treonină) implicate în desensibilizare. Segmentul 7 joacă un rol în recunoașterea agonștilor; segmentul 3 interacționează cu proteina G.

categorii fac parte receptorii pentru: insulină, factorul de creștere insulin-like (IGF-1), factorul de creștere epidermic (EGF), factorul de creștere derivat din plachete (PDGF) ș.a. (fig. 2.45).

Receptorii se caracterizează printr-o mobilitate deosebită în planul membranei din care fac parte. Ei se pot conglomeră, formând zone de sensibilitate acută pentru mesagerul primar (vezi, de exemplu, chemotactismul în cadrul capitolului privind leucocitele), sau se pot răspândi difuz pe suprafața celulei, atunci când zona cu concentrații cumulate de mesager primar dispăre (vezi, de exemplu, difuziunea receptorilor colinergici de tip N în cazul hipersensibilității de deșervare a fibrelor musculare striate scheletice). Această mobilitate este probabil legată și de activitatea unor elemente aparținând citoscheletului, ancorate în membrana celulară.

Se estimează că pe suprafața unei celule-jintă există aproximativ 10^4 - 10^5 receptori. Aceste structuri suferă un permanent turnover. Receptorul insulinic, de exemplu, are un timp de înjumătățire de aproximativ 7 ore. După sinteză, receptorii nou-produși se inseră difuz în membrana celulară. După fixarea hormonului specific, ei conglomerază, mai ales la nivelul invaginațiilor membranare, fiind ulterior internalizați prin

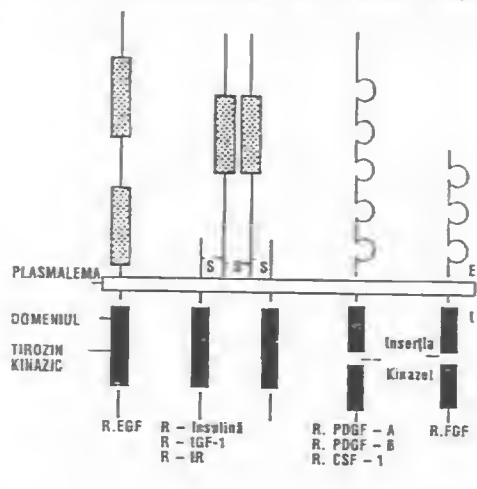
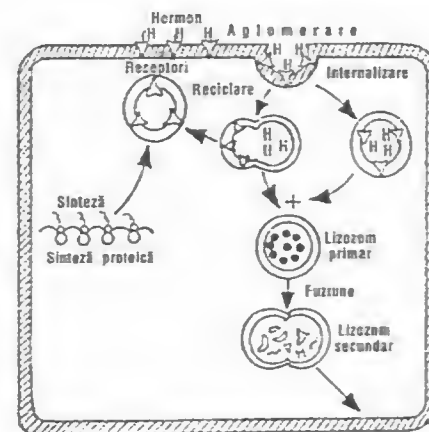


Fig. 2.45. Structura diferitelor subclase de receptori protein-tyrosin kinazici (modificat după Berne și Levy, 1992). Subclasele I și II au domenii extracelulare bogate în cisteină. În timp ce subclasele III-IV au domenii extracelulare imunoglobulinice. Domeniile protein kinazice sunt cele mai conservate. Grupările carboxil terminale intracelulare sunt situsuri de reglare. EGF, factorul de creștere epidermic. IGF-1, factorul de creștere insulin-like 1. IR, proteina insulinică. PDGF, factorul de creștere derivat din plachete. CSF-1, factorul stimulator de colonii 1. FGF, factorul de creștere fibroblastic.

Fig. 2.46. Metabolismul receptorilor hormonal (reprezentare schematică adaptată după Best-Taylor, 1992).



receptorii pentru lipoproteine de densitate scăzută – LDL – care transportă colesterol) (fig. 2.46). Alți receptori (insulină, EGF etc.) rămân împreună cu ligandul în vezicula de endocitoză, fiind degradați sub acțiunea enzimelor lizozomale. Uneori, posibil în cazul insulinei, ligandul hormonal este eliberat în citoplasmă și declanșează reacții intracelulare. Faptul că formarea complexului H-R la suprafața celulei este urmată de internalizare constituie o modalitate importantă de reglare a numărului de receptori disponibili prin concentrația hormonului specific. De câte ori celula este expusă la concentrații excesive de hormon pe durate semnificative, apare fenomenul de „down-regulation” al receptorilor specifici, al căror număr se reduce odată cu sensibilitatea celulei pentru hormonul în cauză. Fenomenul explică „desensibilizarea” la acțiunea unor mesageri primari, cum ar fi în cazul insulino-rezistenței din diabetul zaharat de tip II sau al desensibilizării la administrarea repetată de adrenalină. În deficitul de durată al unor hormoni apare fenomenul invers, de „up-regulation”. Sensibilitatea celulei la hormon fiind mărită datorită acumulării de receptori neinternalizați. Fenomene similare apar și sub acțiunea unor hormoni heterologhi. De exemplu, tiroxina mărește numărul de beta-receptori adrenergici, ceea ce explică simpaticotonia ce apare în cursul tireotoxicozei, fără o creștere a concentrației catecolaminelor circulante. Dacă variațiile numărului de receptori par a constitui un important element de reglare a transmiterii mesajelor din mediul extracelular, modificarea afinității receptorilor pentru ligandul specific intervine mai rar. De exemplu, receptorii la insulină pot prezenta o cooperativitate negativă, care reduce afinitatea pe măsură ce ocupanța prin insulină crește. Anumiți agenți activi la nivel membranal pot reduce afinitatea receptorului (de exemplu, forbolesterii în cazul receptorilor pentru EGF).

În numeroase cazuri, numărul receptorilor membranari depășește pe cel necesar pentru obținerea unui răspuns celular maxim, la ligandul respectiv. Existența unei astfel de populații de receptori „de rezervă” permite creșterea sensibilității sistemului la variațiile concentrației de mesageri primari și, în același timp, asigură menținerea răspunsului biologic maxim.

h) Reacția secundară constă din declanșarea, ca o consecință a reacției primare, a unei suite de etape prin care se ajunge la răspunsul celular specific mesagerului primar incriminat. În funcție de localizarea receptorilor și de timpul de declanșare, reacțiile secundare pot fi de cel puțin trei tipuri (fig. 2.47);

– reacții imediate (de ordinul milisecundelor) sunt caracteristice acțiunii neuromediatelor sinaptici, precum și tuturor situațiilor în care receptorul incriminat controlează activitatea unui canal ionic în structura căruia se află (canal ionic chimic-dependent receptor-operat). Cuplarea mesagerului I cu receptorul determină trecerea instantanee a canalului în tranziția

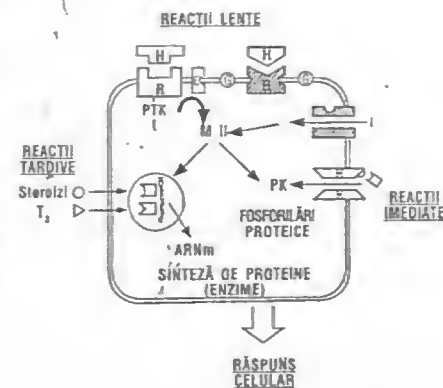


Fig. 2.47. Principalele tipuri de reacții hormon-receptor la nivel celular.

„deschis”, având drept consecință fluxuri ionice ce duc la apariția fie a unui potențial de acțiune excitator – EPSP – (depolarizare), fie a unui potențial inhibitor – IPSP –, cu consecințe funcționale ce vor fi detaliate în capitolele referitoare la transmiterea sinaptică și contracția musculară;

– reacții lente (de ordinul secundelor-minutelor) presupun intervenția unei subunități de cuplare (traductoare), care este activată de modificarea suferită de extremitatea activantă (situsul activ) a moleculei receptoare în momentul cuplării situsului de recunoaștere (subunitatea de recunoaștere) cu mesagerul I. Traductorul activ determină, la rândul său, intrarea în acțiune a unui efector celular. Dintre subunitățile traductoare, cele mai bine cunoscute astăzi sunt așa-zisele proteine G traductoare, a căror activare este GTP-dependentă (vezi mai jos). Efectorul activat de subunitatea traductoare poate fi, după caz, fie un canal ionic membranar care, odată deschis, determină fluxuri ionice cu variate consecințe, fie o enzimă membranară sau submembranară. Activarea acestor efectori determină producerea și lansarea în citoplasmă a unor semnale chimice care reprezintă sistemul mesagerilor secunzi (mesageri II). Ținta acțiunii acestor semnale este reprezentată de efectori celulari – enzime din categoria protein kinazelor specifice. Procesele de fosforilare proteică induse de protein kinaze determină transconformarea și modificarea funcției anumitor proteine specifice. Aceste modificări reprezintă substratul direct al răspunsului celular specific la acțiunea mesagerului primar. Procesul este reversibil, în sensul că proteinele pot reveni la starea defosforilată de repaus sub acțiunea unui sistem de fosfataze intracelulare care opresc răspunsul celular. Această cascadă de evenimente biochimice rapide este implicată în declanșarea marii majorități a funcțiilor celulare și va fi detaliată mai jos. Există situația în care activarea protein kinazelor specifice se poate realiza și direct, fără participarea vreunui mesager II. Este vorba de o familie de receptori cu o activitate protein-tirozin kinazică intrinsecă. Enzima, activată direct de receptor, este situată pe fața internă a membranei, determinând efecte biologice legate probabil de creșterea celulară, enzima fiind implicată în transformarea ARN viral tumoral și activată de numeroși factori de creștere produși de tumori. Din această categorie fac parte receptorii la insulină, IGF-1, PDGF și factorul macrofagic de stimulare a coloniilor etc. Pe lângă acest mod de acțiune, receptorii menționați pot utiliza și mesageri secunzi;

– reacții tardive (de ordinul orelor) apar în cazul activării unor receptori intracelulari de către hormoni liposolubili ce pot traversa domeniul plasmalemei. Astfel de mesageri secunzi sunt hormonii steroizi și tiroidieni. Receptorii pentru acești hormoni formează o familie genetică extinsă, care include receptorii cu specificitate și afinitate pentru fiecare dintre numeroasele clase de hormoni steroizi, receptorii pentru hormonii tiroidieni, vitamina D și acidul retinoic. Structurile acestor receptori sunt înalt conservate, prezintă un domeniu central ADN-ligand și conținând așa-zisele „degete” zinc-specifice, caracteristice proteinelor reglatoare care se leagă de ADN. Situsul pentru hormon este localizat la extremitatea C, în timp ce extremitatea N', cu structură variabilă, poate fi recunoscută de anticorpi (fig. 2.48). Hormonii steroizi, difuzând prin plasmalemă, se fixează pe receptorii specifici care se activează, căpătând o nouă configurație

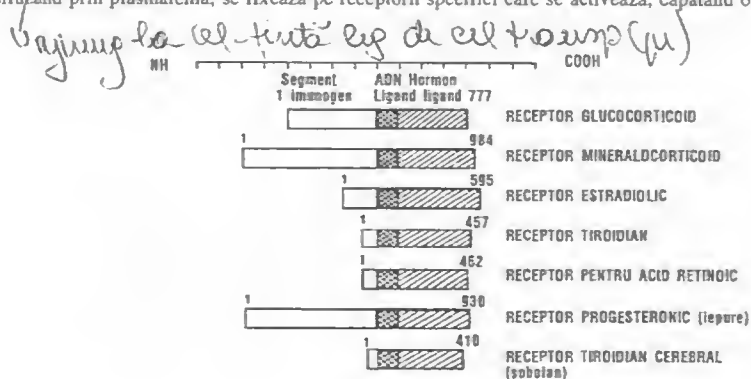


Fig. 2.48. Structura receptorilor pentru hormoni steroizi (modificat după Best-Taylor, 1992).

ce le permite să pătrundă în nucleu și să se fixeze pe cromatină la nivelul secvențelor specifice ale ADN. Aceste secvențe, elemente ale răspunsului hormonal, sunt amplificatori care, fixând proteine pe anumite situsuri, reglează transcripția unor gene specifice. În acest mod, familia receptorilor hormonilor steroizi intră în marea clasă a factorilor transcripționali ce controlează expresia genetică, acționând la nivelul ARN-polimerazelor și modificând astfel producerea de ARNm specific, în funcție de necesitățile ce au generat mesajul extracelular. În cazul receptorilor pentru hormoni tiroidieni, localizarea acestora este nucleară, fiind fixați pe cromatină. Au afinitate maximă pentru triiodotironină (T_3), forma cea mai activă metabolic dintre hormonii tiroidieni.

c) Sistemul proteinelor G: proteinele GTP-dependente se caracterizează prin capacitatea de a se activa prin legarea GTP (guanozin trifosfat), pe care îl hidrolizează cu formare de GDP, caracteristic formei inactive. Aceste proteine reprezintă un fel de comutatoare moleculare cu rol în reglarea unui mare număr de procese intracelulare. Ele se caracterizează, în general, prin prezența unui situs de legare pentru guanil-nucleotide și a unei activități GTPazice intrinseci. Sunt cunoscute astăzi două clase de proteine G: proteinele G heterotrimerice și proteinele G mici (cu greutate moleculară redusă).

Proteinele G heterotrimerice sunt formate din trei subunități: (1) o subunitate alfa, de cca 40–45 000 daltoni; (2) o subunitate beta, de cca 17 000 daltoni și (3) o subunitate gamma, de 8–10 000 daltoni. Se cunosc astăzi cel puțin 16 gene diferite care codifică subunitatea alfa, 4 gene pentru beta și 6 gene pentru subunitatea gamma. Funcția și specificitatea unei proteine G sunt de obicei conferite de subunitatea alfa, în timp ce subunitățile beta și gamma sunt interschimbabile. Tabelul alăturat (tabelul 2.1V) prezintă cele mai bine studiate proteine G până la ora actuală, precum și căile de transducție în care sunt implicate.

Proteinele G heterotrimerice funcționează ca intermediari între receptorii membranari pentru peste 100 de mesageri I și procesele intracelulare controlate de aceștia. În repaus, proteina G se află în stare heterotrimerică, subunitatea alfa conținând GDP în situsul pentru nucleotide. În momentul formării complexului hormon-receptor, acesta interacționează cu subunitatea alfa, care își schimbă configurația, mărind-și afinitatea pentru GTP și reducându-și afinitatea pentru GDP, ca și cea pentru subunitățile beta-gamma. Ca urmare, subunitatea alfa activată cedează GDP înlocuindu-l cu GTP și disociază de subunitățile beta-gamma. Dimerul desprins poate și el exercita unele dintre efectele incluse în răspunsul receptor-mediat. Subunitățile beta-gamma se pot fixa la nivelul altor subunități alfa aflate în mediul membranar, blocându-le, cu consecințe funcționale evidente.

TABELUL 2.1V

Principalele clase de proteine G heterotrimerice
(completat după Bourne și colab., 1990)

Proteină G	Receptori pentru	Efectori	Mesager II
Gs	Adrenalină, noradrenalină, histamină, glucagon, ACTH, LH, FSH, TRH ș.a.	Adenilat ciclază	cAMP ↑
Gi-1, Gi-2, Gi-3	Noradrenalină, prostaglandine, opioizi, angiotensină, alte peptide	Adenilat ciclază Fosfolipază C Fosfolipază A ₂ Canale de K ⁺	cAMP ↓ IP ₃ , DAG, Ca ²⁺ ↑ Eliberare de arahidonat Polarizare membranară
Golf	Substanțe odorante	Adenilat ciclază	cAMP ↑ (olfacție)
Gt-1 – bastonașe	Fotoni (transducină)	cGMP-fosfodiesterază	cGMP ↓ (vedere)
Gi-2 – conuri	Fotoni	cGMP-fosfodiesterază	cGMP ↓ (vedere colorată)
Go	Adenozină (ș.a.)	Adenilat ciclază	cAMP (?)
Gp	?	Fosfolipază C	IP ₃ și DAG ↑

GRC Ro

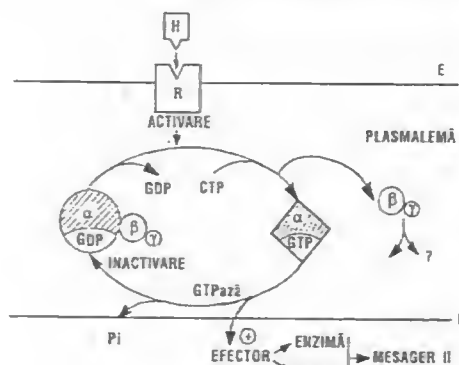


Fig. 2.49. Ciclul proteinelor G traductoare

2.3.5.3. Sistemul mesagerilor secunzi și acțiunea lor asupra protein kinazelor și a protein fosfatazelor

Informația biologică conținută în complexul hormon-receptor este transmisă intracelular prin semnale intracelulare, așa-zisii mesageri secunzi (mesageri II). Conceptul existenței sistemului de mesageri secunzi, care a revoluționat înțelegerea mecanismelor de control celular, a fost emis de Sutherland după descoperirea cAMP, în 1957 (Sutherland și Rall, 1958). Principalii mediatori intracelulari ai acțiunii mesagerilor primari sunt: ionii de Ca^{2+} , nucleotidele ciclice (cAMP și cGMP), derivații de fosfatidilinozitol membranar (IP₂ și DAG). În afara acestor trei clase, mai există numeroși candidați pentru funcția de mesager II (derivații de acid arahidonic, NO, transmetilările, unele fluxuri ionice de K^+ etc.).

a) **Mecanismul general de acțiune al mesagerilor secunzi.** Odată formați în mediul intracelular, mesagerii II se cuplează cu receptori specifici intracelulari, declanșând reacții de activare prin transformare a unor proteine intracelulare. Aceste reacții pot fi: (1) *immediate*, de ordinul milisecundelor, cum ar fi, de exemplu, în cazul Ca^{2+} , cuplarea cu troponina C (TnC) din care rezultă activarea ATPazei acto-miozinice și declanșarea mecanismului glisant al contracției musculare; (2) *lente*, de ordinul secundelor-minutelor, care asigură o amplificare considerabilă a răspunsului și, în esență, constau din cuplarea activatoare cu protein kinaze (PK) intracelulare și declanșarea unor reacții de fosforilare a proteinelor specifice care asigură răspunsul celular.

b) **Ionii de Ca^{2+} în calitate de mesageri II.** În condiții de repaus celular, concentrația Ca^{2+} liber citoplasmatic $[\text{Ca}^{2+}]$ este menținută la valori sub 10^{-7} mol/l. Această concentrație redusă este rezultatul echilibrului ce se stabilește între influxul de Ca^{2+} și efluxul său. Influxurile de Ca^{2+} pot proveni fie din exteriorul celulei, fie din depozitele intracelulare de Ca^{2+} legat. Influxurile de Ca^{2+} din exterior se realizează prin canalele de Ca^{2+} de tip I ($I_{\text{L}} = \text{leak}$), voltaj-dependente și *dihidropiridin-modulate*, I_{SA} , activate mecanic (*stretch activated*), voltaj-dependente și receptor-operate fie direct, prin mesageri I, fie prin proteine G din complexul receptor sau de alți mesageri secunzi (cAMP, cGMP, IP₂). Influxul de Ca^{2+} liber poate proveni și din depozitele intracelulare reprezentate de mitocondrii sau de reticulul endo(sarco)plasmatic. Și aceste efluxuri pot fi receptor-operate (IP₂) sau voltaj-dependente (reticulul sarcoplasmatic). Tendințele de creștere a concentrației de Ca^{2+} liber citoplasmatic prin mecanismele enumerate sunt compensate în repaus de efluxuri echivalente realizate fie spre exterior (pompa ATPazică de Ca^{2+} receptor-operată și modulată de alți mesageri II și sistemul antiport 2-3 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$, menționat anterior), fie spre depozite (recaptare prin ATPaze de Ca^{2+}).

Activarea celulară fie prin apariția potențialelor de acțiune (PA), fie sub acțiunea cuplării unui mesager I cu receptori specifici stimulează semnificativ influxul și mobilizarea Ca^{2+} din depozite. Când

Concomitent cu modificările de afinitate susmenționate, în structura monomerului G-alfa are loc și activarea GTPazei. Acest proces este lent, astfel încât permite monomerului activ să pună în acțiune efectorul sistemului (canal ionic sau enzimă) înainte de hidroliza completă a GTP și trecerea în forma inactivă, conținând ADP cu care se închide ciclul (fig. 2.49).

Proteinele G mici reprezintă a doua clasă de proteine GTP-dependente intracelulare. Sunt caracterizate prin Mr redus (20–35 000 daltoni) și structură monomerică. Activate prin înlocuirea GDP cu GTP, ele nu sunt implicate în medierea unor semnale extracelulare, ci în procesele de control intracelular (elongarea lanțurilor polipeptidice în sinteza proteică, proliferarea și diferențierea celulară, transformarea neoplazică, transportul vezicular între organite, exocitoză).

această creștere depășește valoarea prag de 10^{-5} mol/l, apare răspunsul celular declanșat de Ca^{2+} , în calitate de mesager II. În funcție de receptori utilizați și de calea, urmată, răspunsurile la Ca^{2+} acoperă o plajă extraordinară de largă de răspunsuri celulare.

Cuplarea cu TnC, declanșând activitatea unor acto-miozin kinaze, este comutatorul molecular al contracției musculare. Un alt receptor intracelular de Ca^{2+} , de o covârșitoare importanță funcțională, este *calmodulina*. Această proteină ubicuară, descoperită în urmă cu două decenii de Cheung și colab., poate deveni activă prin cuplarea cu 1–4 ioni de Ca^{2+} . Gradul de ocupare determină acțiunea specifică a proteinei, a cărei structură este similară cu cea a TnC. În funcție de alterarea conformațională rezultată în urma cuplării cu Ca^{2+} , această proteină reglatoare poate modifica activitatea a numeroase enzime celulare, cum ar fi ciclic nucleotid fosfodiesteraza (care degradează cAMP și cGMP), guanilat ciclaza (formatoare de cGMP), adenilat ciclaza (formatoare de cAMP), fosfolipaza A₂ (PLA₂) și categoria largă a protein kinazelor Ca^{2+} -calmodulin-dependente (Ca^{2+} -CaMPK) prezentate în tabelul alăturat (tabelul 2.V).

Este de subliniat faptul că, prin efectele de activare a altor mesageri II, complexul Ca^{2+} -CaM creează posibilitatea interacțiunii modulatorie a două sau mai multe linii de semnalizare intracelulare receptor-activate, cu consecințe adesea surprinzătoare asupra răspunsului totalizator final („receptor cross-talk”).

TABELUL 2.V

Familia protein kinazelor Ca^{2+} -calmodulin-dependente și acțiunile implicate (modificat după Berne și Levy, 1992)

Enzima	Substrat	Mr – Structură	Acțiuni
Kinaza miozinei ușoare (MLCK)	Miozina ușoară	80–150 kDa	Contracția mușchilor netezi
Fosforilaz kinaza	Fosforilaza	1.3×10^5 kDa (α β γ δ)	Glicogenoliză
(Ca^{2+} -CaM)PK I	Sinapsina I (sitius I) Proteina III	48 kDa	
(Ca^{2+} -CaM)PK II	Sinapsina I (sitius II) Glicogen sintaza MAP-2 Tirozina	250–600 kDa (α_1 β_1)	Eliberarea sinaptică a neuromediatorilor Glicogenogeneză Creșterea dezasamblării microtubulilor
(Ca^{2+} -CaM)PK III	Factorul de elongare 2	140 kDa	Sinteză de proteine

c) **Nucleotidele ciclice (cAMP și cGMP).** Apar în situațiile în care receptorul specific activat de mesagerul primar este cuplat printr-o subunitate traductoare (proteina G) de un efector enzimatic capabil să catalizeze formarea de cAMP din ATP (adenilat ciclaza) și, respectiv, de cGMP din GTP (guanilat ciclaza). Variațiile de concentrație ale cAMP, rezultate prin cuplarea adenilat ciclazei cu subunitatea traductoare activatoare (G-alfa s) sau inhibitoare (G-alfa i) (fig. 2.50), își exercită

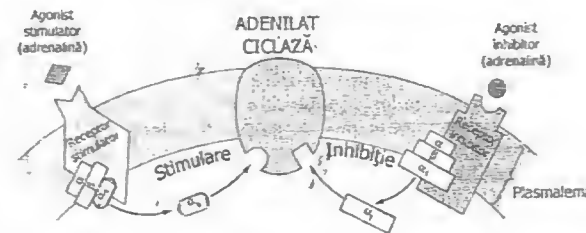


Fig. 2.50. Activarea și inhibirea adenilat ciclazei prin proteinele traductoare G (modificat după Berne și Levy, 1992).

Informația transmisă celulei prin mesager suferă o amplificare succesivă la nivelul treptelor enzimatică ale liniei de semnalizare activate prin formarea complexului H-R. O primă amplificare importantă este localizată la nivelul efectorului enzimatic, prin care semnalul transportat de mesagerul primar este exprimat prin formarea unui număr considerabil de molecule de mesageri secunzi intracelulari. A doua amplificare se realizează prin activarea protein kinazelor care fosforilează o cantitate de proteine celulare, realizând masa critică pentru declanșarea unui răspuns celular multiplu și eficient. Oprirea acestui răspuns, pentru a face celula aptă să răspundă altui mesaj, se realizează prin fosforilarea însăși de proteine fosfataze specifice. Aceste sisteme enzimatică, care reprezintă cel de al doilea braț al balanței echilibrului celular, au focalizat eforturi de cercetare deosebite în ultimii ani. S-au descris, în paralel cu protein kinazele cunoscute, două sisteme de protein fosfataze (PP): serin-treonin protein fosfatazele și tirozin fosfatazele.

a) *Serin-treonin protein fosfatazele* reprezintă o familie largă de molecule legate structural, ce pot fi clasificate în două tipuri principale (PP-1 și PP-2), în funcție de subunitatea fosforilaz kinazei pe care o defosforilează. PP-1 acționează preferențial pe subunitatea beta, iar PP-2 defosforilează subunitatea alfa. PP-2 a fost subclasificată în PP-2A, -B și -C în funcție de cation-dependența lor absolută. PP-2A nu necesită cationi pentru activare, în timp ce PP-2B necesită în mod absolut Ca^{2+} -CaM, iar PP-2C nu poate fi activată decât în prezența Mg^{2+} . PP-1 citosolic este relativ inactiv dar, legându-se prin structuri peptidice de recunoaștere de incluziunile de glicogen, reticulul sarcoplasmatic și miofibrile, poate fi activat, manifestând o specificitate deosebită în procese legate de aceste structuri. PP-2 sunt active în citosol.

Activitatea PP-1 este reglată de două proteine inhibitoare endogene (I-1 și I-2). I-1 devine eficace abia după fosforilarea sa de către PKA (un alt fenomen de „cross-talk”). Acest inhibitor, odată activat, leagă PP-1, desprinzându-l de pe structurile pe care este fixat. Odată trecut în citosol, PP-1 devine inactiv.

b) *Protein-tirozin fosfatazele* (PTP), mai puțin cunoscute, nu sunt structural omoloage cu PP-1 și -2 (spre deosebire de PK, care au un precursor comun și omologie avansată). În timp ce unele PTPaze de dimensiuni mici sunt citosolice (PTPaza-18 și PTPaza limfocitelor T), altele sunt proteine membranare mari, integrale, cu o structură ce sugerează existența unor receptori extracelulari cu liganzi încă neidentificați. Este cazul PTPazei CD45 (antigen leucocitar comun, implicat în procesele imunității celulare) sau al PTPLAR (proteina legată de antigenul leucocitar comun), care are o structură asemănătoare cu N-CAM (molecula de adeziune a celulelor neurale), importantă în dezvoltarea sistemului nervos.

3. PROPRIETĂȚILE FUNDAMENTALE ALE MATERIEI VII

3.1. EXCITABILITATEA

Organismele vii prezintă trei proprietăți fundamentale: excitabilitatea, metabolismul și reproducerea. Dacă metabolismul și reproducerea sunt, în general, atribuite altor ramuri ale științelor fundamentale, excitabilitatea este domeniul exclusiv al științelor fiziologice.

Excitabilitatea este proprietatea materiei vii de a reacționa prin manifestări specifice (contractie, secreție, elaborarea influxului nervos etc.) la acțiunea unor stimuli (variații energetice calitativ-cantitative) din mediul ambiant.

Această proprietate, comună tuturor structurilor vii, este esențială și complet dezvoltată în cazul celulelor nervoase și musculare.

Starea de repaus celular este caracterizată prin stabilirea unui echilibru metabolic trădat, în ultimă instanță, de echilibrul de încărcare electrică a celor două fețe-membranare. Variații energetice exterioare (uneori și interne), acționând asupra celulei vii, determină perturbarea echilibrului respectiv, declanșând astfel un lanț de procese fizico-chimice intracitoplasmatică, a căror consecință este răspunsul specific celular, starea de excitabilitate.

Orice agent din mediul ambiant capabil să determine reacție de răspuns din partea unei structuri vii poartă numele de *excitant*.

În funcție de caracteristicile lor, excitanții se clasifică în excitanți generali și excitanți specifici. Excitanții generali sunt reprezentați de orice variație energetică capabilă să determine răspuns din partea celulelor vii, indiferent de particularitățile lor morfo-funcționale. Din această categorie fac parte excitanții artificiali care, în funcție de natura lor, pot fi: *fizici* (mecanici, termici, electrice, radiații etc.) sau *chimici* (acizi, baze, săruri etc.). În laborator se utilizează ca excitanți curentul electric, întrucât prezintă o serie de avantaje: produce modificări reversibile, așa încât poate fi repetat cu ușurință; poate fi aplicat o anumită durată, dar, în același timp, se poate stabili exact momentul aplicării. Un exemplu de excitant fiziologic specific este influxul nervos pentru fibra musculară. Nervii și mușchii sunt țesuturi excitabile.

Dacă excitabilitatea unei celule este în funcție de intensitatea proceselor metabolice intracitoplasmatică, materializarea ei reclamă o serie de condiții și din partea stimulului, cunoscute sub numele de legile generale ale excitabilității:

a) apariția reacției de răspuns din partea unui țesut viu, la stimulare, se produce numai în cazul în care excitantul are o anumită intensitate – intensitatea prag sau liminară;

b) stimularea subliminară produce modificări membranare locale care pot genera starea de excitație în cazul în care se repetă la scurte intervale de timp;

c) creșterea intensității stimulului este urmată în cadrul anumitor structuri de o amplificare proporțională a reacției de răspuns, până la o manifestare maximă – reacție maximală. După acest moment, oricât ar crește intensitatea excitantului, reacția de răspuns nu se mai modifică;

d) răspunsul celular apare după un anumit interval de timp din momentul acțiunii excitantului. Acest interval poartă numele de perioadă de latență sau timp de latență și este necesar producerii modificărilor fizico-chimice intracitoplasmatică capabile să traducă stimulul în reacție de răspuns;

e) excitantul trebuie să acționeze cu o anumită bruscă și să persiste o durată minimă de timp pentru a produce stimularea celulei;

f) procesul de stimulare produce modificări de excitabilitate în structura vie, așa încât aceasta se va comporta diferit în condițiile unui nou impact cu variații energetice din mediul înconjurător.

Manifestările primare ale acțiunii oricărui agent excitant sunt localizate la nivelul interfeței celulă-mediul, adică la nivelul membranei celulare. Orice modificare indusă la nivelul membranei celulare determină modificări de permeabilitate, urmate de schimburi ionice ce alterează repartiția sarcinilor electrice între mediul extra- și cel intracelular. În acest mod, membrana iese din starea de echilibru caracteristică repausului și devine sediul unor modificări de potențial electro-chimic caracteristice stării de activitate. În funcție de intensitatea și capacitatea de propagare a acestor modificări, se pot deosebi două categorii de membrane celulare:

Membranele zise „inexcitabile”, în care modificările de permeabilitate, fluxurile ionice sunt reduse ca amplitudine și nu se propagă (de exemplu, membrana celulelor hepatice, conjunctive, osoase etc.). În astfel de membrane nu apar potențiale de acțiune, deși modificările de permeabilitate ionică continuă să fie principala modalitate de declanșare a răspunsului celular specific.

Membranele excitabile propriu-zise, în care modificările de permeabilitate ionică determină variații importante de potențial electro-chimic, ce se pot propaga sub denumirea de potențiale de acțiune. În cazul acestor membrane (din neuroni și fibrele musculare), expresia cea mai evidentă și simplă de urmărit a excitației este manifestarea electrică. În studiul și înțelegerea funcției acestor țesuturi, tehnicile electro-fiziologice ocupă un loc de prim ordin. Ele surprind rapid și specific atât încărcarea electrică a celulelor excitabile, cât și viteza de conducere diferită a unei de excitație. Substratul funcțional al acestor procese este asigurat de potențialul de acțiune, iar substratul structural îl reprezintă canalele ionice voltaj-dependente.

3.1.1. BAZELE ELECTRO-CHIMICE ALE EXCITABILITĂȚII NEURONALE

Particularitățile structurale și metabolice ale neuronului și prelungirilor sale sunt subordonate funcției sale fundamentale de a prelua și transmite mesaje, asigurând reacția adaptativă integrată a organismului la condițiile mediului înconjurător. Datorită acestui fapt, se consideră că excitabilitatea și conductibilitatea sunt principalele caracteristici funcționale neuronale. Ambele sunt, în esență, proprietăți și moduri de răspuns ale membranei celulare neuronale, care răspunde prin modificări de permeabilitate și fenomene electro-chimice la stimulii din mediu.

3.1.1.1. Originea potențialului de repaus

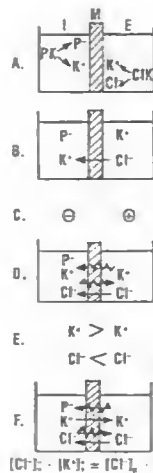


Fig. 3.1. Echilibrul Donnan. I și E, două soluții separate printr-o membrană semipermeabilă (M). P, anion impermeabil. Cl⁻ și K⁺, anioni și respectiv cationi permeabili. A: starea inițială. B: Cl⁻ traversează prin gradient de concentrație. C: se realizează o diferență de încărcare electrică. D: forța electrostatică determină fluxul de sens contrar al K⁺ și Cl⁻. E: apare diferența de concentrație. F: apare starea de echilibru (Donnan) când fluxul net de substanțe difuzibile este nul. Între cele două compartimente există diferențe de concentrație și încărcare electrică, ce se anulează reciproc.

cele electrostatice. Când forțele de difuziune tind să egaleze forțele electrostatice opuse ca sens, se ajunge la o stare de echilibru, cunoscută și sub numele de echilibru Donnan. În condițiile echilibrului, cele două fluxuri de ioni, cel generat de forțele de difuziune și cel generat de forțele electrostatice, sunt egale și de sens contrar, mișcarea netă a ionilor fiind egală cu zero (fig. 3.1).

Starea de echilibru menționată poate fi exprimată prin *legea Nernst*, ce permite aflarea diferenței de potențial generate de repartiția la echilibru a unei specii ionice date ($I^{+/-}$).

Forțele electrostatice sunt reprezentate de lucrul mecanic ce trebuie depus pentru traversarea membranei de către ionul respectiv împotriva diferenței de potențial existente.

$$W = Z \times E \times F \quad (1)$$

în care W este lucrul mecanic; Z = valența ionului; E = diferența de potențial și F = sarcina (96 000 coulombi).

În mod similar, **forțele de difuziune** pot fi exprimate prin lucrul mecanic ce trebuie depus pentru traversarea membranei de către același ion împotriva diferenței de concentrație:

$$W = R \times T \times \log_e \frac{(I^{+/-})_i}{(I^{+/-})_e} \quad (2)$$

în care R este constanta universală a gazelor; T = temperatura absolută; \log_e = logaritmul natural; $(I^{+/-})_i$ și $(I^{+/-})_e$ = concentrația ionului în mediul intra- și, respectiv, extracelular.

La echilibru, când cele două forțe sunt egale:

$$Z \times E \times F = R \times T \times \log_e \frac{(I^{+/-})_i}{(I^{+/-})_e} \quad (3)$$

de unde:

$$E \times I^{+/-} = \frac{RT}{ZF} \log_e \frac{(I^{+/-})_i}{(I^{+/-})_e} \quad (4)$$

Relația (4) este cunoscută și sub denumirea de *legea lui Nernst* și arată că repartiția la echilibru a unui ion pe cele două fețe ale membranei celulare determină un potențial de repaus. Deoarece la 37° și în cazul ionilor monovalenți:

$$\frac{RT}{ZF} = 61 \quad (5)$$

rezultă că valoarea acestui potențial depinde de diferența de concentrație ionică între cele două medii, astfel încât, trecând de la \log_e la \log_{10} :

$$E = 61 \log_{10} \frac{(I^{+/-})_i}{(I^{+/-})_e} \quad (6)$$

Referindu-se la o singură specie ionică, ecuația Nernst furnizează valori pentru diferența de potențial realizată de un ion (potențialul de echilibru). Generalizând această ecuație, Goldman-Hodgkin și Katz au arătat că potențialul de repaus transmembranar poate fi considerat ca fiind suma potențialelor de echilibru pentru principalele specii ionice aflate în mediul extra- și respectiv intracelular (Na^+ , K^+ , Cl^-), în funcție de permeabilitatea membranei pentru fiecare tip de ion:

$$E_m = \frac{RT}{F} \log \frac{P_K(K^+)_e + P_{Na}(Na^+)_e + P_{Cl}(Cl^-)_i}{P_K(K^+)_i + P_{Na}(Na^+)_i + P_{Cl}(Cl^-)_e} \quad (7)$$

Ecuția Goldman-Hodgkin-Katz

în care E_m este potențialul transmembranar, P_K , P_{Na} și P_{Cl} reprezintă permeabilitățile membranei pentru ioni în cauză, iar restul simbolurilor au semnificațiile deja expuse.

Utilizând relațiile de mai sus și cunoscând concentrațiile ionice, s-au putut calcula potențialele de echilibru pentru fiecare specie ionică. Rezultatele sunt prezentate în tabelul 3.1.

Se poate observa că doar în cazul clorului și, mai ales, al potasiului potențialele de echilibru sunt apropiate de valorile măsurate cu microelectrozi ale potențialului transmembranar (E_m). Potențialul de echilibru al sodiului este de sens contrar.

TABELUL 3.1

Concentrațiile ionice și potențialele de echilibru membranar

Specia ionică	Concentrație (mM/l)		Potențialul de echilibru E_i (mV)
	Intracelular	Extracelular	
Clor	4	120	-70
Potasiu	145	4	-90
Sodiu	12	145	+60 mV

Din cele de mai sus (vezi ecuația Goldman), rezultă că participarea unui ion la geneza potențialului transmembranar (E_m) depinde nu numai de repartiția sa, ci și de permeabilitatea membranală de care beneficiază. Cu cât permeabilitatea este mai redusă, cu atât participarea sa la geneza potențialului transmembranar scade, iar potențialul său de echilibru are valori mai reduse. De aici concluzia că, în condiții de repaus, permeabilitatea membranei față de Na^+ este practic nulă, în timp ce permeabilitatea față de K^+ și Cl^- atinge valori foarte mari.

Faptul că interiorul celulei conține anioni mari, nepermeanți, ce atrag și fixează K^+ , a dus la concluzia că în geneza potențialului transmembranar de repaus repartiția K^+ este fenomenul primar, în timp ce repartiția Cl^- este un fenomen secundar, determinat de polarizarea prealabilă a membranei. Astfel se explică de ce potențialele măsurate sunt mai apropiate de valorile de echilibru calculate pentru K^+ .

Impermeabilitatea de repaus a membranelor excitabile la ioni de Na^+ a primit numeroase explicații ce pot fi rezumate după cum urmează:

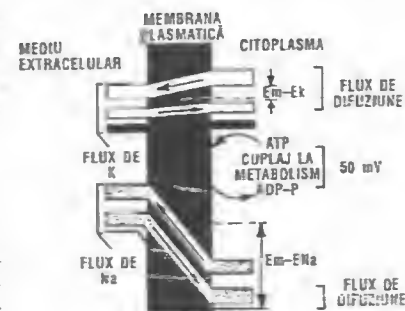
- ioni de Na^+ , datorită hidrofiliilor accentuate an un diametru mai mare decât cei de K^+ , ceea ce le reduce mult posibilitatea de permeație prin „porii” membranei;
- numărul canalelor specifice pentru Na^+ la nivelul membranei în repaus este mult mai mic decât cel al canalelor specifice pentru K^+ ;
- zonele prin care Na^+ poate traversa membrana sunt blocate în repaus de barierele de impermeabilitate ce se deschid în momentul stimulării (vezi mai sus);
- fluxul transmembranar de Na^+ există și în repaus (deși de 20-25 de ori mai redus decât cel pentru K^+). Acest flux poate fi total contracarat de pompa de Na^+/K^+ , care asigură evacuarea permanentă a ionilor de Na^+ pe măsură ce pătrund în interiorul celulei.

Asigurând anularea influxului de Na^+ se poate considera că pompa de Na^+/K^+ joacă un rol de factor electrogen, contribuind la menținerea potențialului de membrană la valorile de repaus.

Concluzii. Rezumând datele expuse cu privire la originea potențialului de repaus transmembranar, se poate afirma că acest potențial este generat de inegalitatea de concentrație ionică dintre mediul intracelular și cel extracelular, fiind un fenomen electro-chimic de membrană. Această inegalitate de concentrație este menținută prin:

- factori pasivi (permeabilitate selectivă, echilibrul Donnan);

Fig. 3.2. Schema sintetică a fluxurilor de difuziune și de transport activ de sodiu și potasiu, prin membrană, la starea de echilibru. Pe verticală: diferența de potențial electro-chimic crează de treceri pasive și active transmembranare ale ionilor. Pe orizontală: direcțiile fluxurilor ionice. Punctat: mișcările active. În alb: fluxurile de difuziune. Lărgimea zonelor este proporțională cu intensitatea fluxurilor.



- factori activi (transportul activ de Na^+/K^+).

Aciunea acestor factori este rezumată în figura alăturată, ce prezintă fluxurile transmembranare active și pasive, precum și consecința lor electro-chimică (fig. 3.2).

3.1.1.2. Parametrii excitabilității

Pragul de excitație: aplicarea unui stimul slab nu determină apariția potențialului de acțiune, ci doar a unui răspuns local ce se manifestă ca o depolarizare limitată la o porțiune a membranei. Pe măsură ce intensitatea stimulului crește, depolarizarea se accentuează. Abia în momentul în care stimulul determină depolarizarea cu valori de 10-15 mV apare potențialul de acțiune, ce se propagă neschimbat (nedeclinant), cu viteză finită de-a lungul membranei nervoase. Orice creștere ulterioară a stimulului nu determină creșteri ale răspunsului (legea „tot sau nimic”). Intensitatea stimulării ce determină depolarizarea locală a membranei până la valori la care se declanșează potențialul de acțiune poartă numele de prag de excitație (fig. 3.3).

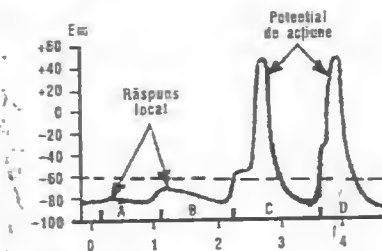


Fig. 3.3. Pragul de excitație și declanșarea potențialului de acțiune. Stimuli subliminari declanșează depolarizări locale progresiv crescând. Depășirea pragului determină lansarea potențialului de acțiune.

După intensitatea lor, stimuli se împart în subliminari, liminari (prag) și supraliminari.

Relația intensitate-durată (reobază, cronaxie): valoarea pragului de excitație variază în funcție de tipul și starea structurii nervoase. Determinarea sa este necesară în vederea stabilirii excitabilității și se poate realiza în condițiile stimulării electrice cu stimuli rectangulare, caracterizați prin amplitudine (măsurată în mV sau mA) și durată.

Cu cât intensitatea stimulului este mai mare, cu atât timpul necesar pentru atingerea pragului de excitație este mai scurt. Această relație este exprimată de hiperbola din figura alăturată (fig. 3.4).

Întrucât determinarea exactă a intensității prag este dificilă, având în vedere panta redusă a curbei la acest nivel, s-a propus definirea excitabilității prin durata necesară aplicării unui stimul de intensitate mare în vederea atingerii pragului de excitație. În acest mod se ating niveluri ale curbei în care panta este maximă și determinările devin precise.

Principiul metodei a fost dezvoltat de Lapicque (1903) și se bazează pe utilizarea următoarelor mărimi:

- reobaza: cea mai mică intensitate de curent ce produce excitație într-un timp nedefinit;

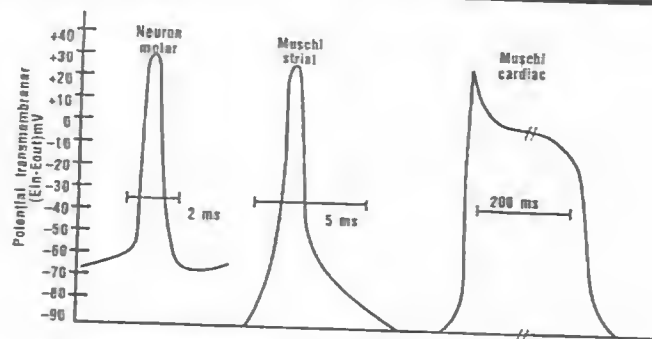


Fig. 3.4. Durata potențialului electric membranal al neuronului motor, fibrei musculare striate și a mușchiului cardiac.

- **timul util principal:** cel mai scurt interval în care un curent de intensitate reobazei atinge pragul de excitație;
- **cronaxia:** timpul util minim în care un curent rectangular de intensitate egală cu dublul reobazei determină excitație.

Detaliile tehnice și interpretative ale metodei vor fi dezvoltate în cadrul altor capitole. Metoda are o valoare deosebită, mai ales atunci când se urmărește determinarea excitabilității neuro-musculare pe baza apariției contracției musculare prag. Cum determinarea acestui prag este dificilă și adesea subiectivă, este lesne de înțeles de ce utilizarea cronaximetriei reprezintă o importantă posibilitate de apreciere a excitabilității sistemului.

Acțiunea polară a curentului galvanic: efectele aplicării curentului continui la nivelul unei fibre nervoase depind de polaritatea electrodului în cauză. La nivelul catodului, printr-un mecanism similar, se vor acumula sarcini negative ce vor determina o creștere a diferenței de potențial (hiperpolarizare). Aceste modificări de polaritate ale curentului aplicat au o importanță electro-fiziologică deosebită.

Se știe că potențialul de acțiune apare ori de câte ori stimulul este capabil să depolarizeze membrana la valoarea pragului de excitație (de exemplu, de la -70 mV, la -10 , -15 mV). Depolarizarea determinată de catod apropie potențialul de membrană de valoarea prag. Intensitatea stimulării necesare pentru a atinge pragul va fi, prin urmare, redusă și excitabilitatea zootei în cauză va crește. Astfel se explică de ce în cazul stimulării electrice cu curent galvanic se consideră ca electrod stimulator, la închiderea circuitului, catodul. În cazul deschiderii circuitului, datorită inversării de flux, situația se inversează.

Modificările de excitabilitate ce au loc într-un nerv sau într-o fibră nervoasă traversată de un curent subliminar sunt descrise sub denumirea de *electrotonus*. La nivelul catodului, scăderea excitabilității se numește catelectrotonus, în timp ce hiperexcitabilitatea determinată de anod este cunoscută sub denumirea de anelectrotonus. Având în vedere că propagarea electrotonică a curentului subliminar se face decremențial, catelectrotonusul și anelectrotonusul scad pe măsură ce ne îndepărtăm de electrodul de stimulare.

Faptul că cele două fenomene nu au aspect în oglindă se explică prin proprietățile de redresor ale membranei neuronale. Rezistența acestei structuri este mult mai mică pentru curentul de „ieșire” ce apare la nivelul catodului, decât pentru curentul de „intrare” ce apare la nivelul anodului și în preajma sa.

Fenomenele de electrotonus și de conducere electrotonică reprezintă fenomene pasive, ce rezultă din proprietățile fizice ale membranei. Cunoașterea lor este importantă în interpretarea unor situații fiziologice reale. Potențialele de acțiune sau depolarizările locale ce apar în cursul activității neuronale cunosc un anumit grad de propagare electrotonică la oivelul structurii în cauză sau al structurilor din vecinătate, determinând astfel stări de electrotonus cu modificările de excitabilitate corespunzătoare.

3.1.1.3. Răspunsul local

În cursul aplicării unor stimuli subliminari depolarizanți (catod), în afara modificării pasive a potențialului de membrană și suprapunându-se acesteia, apare și o depolarizare activă a membranei. Această depolarizare este de amplitudine redusă și se propagă pasiv pe distanțe foarte reduse, de unde și denumirea de *răspuns local*. Anticipând, apariția acestui răspuns se explică prin faptul că stimulul subliminar depolarizant realizează o permeabilizare parțială a membranei pentru ionii de sodiu. Pătrunderea acestor ioni determină răspunsul local, ce se menține un scurt interval și după încetarea acțiunii stimulului depolarizant. Răspunsul local poate fi considerat un caz particular al potențialului de acțiune. În ambele cazuri, mecanismul generator este permeabilizarea la sodiu a membranei, cu deosebire că, în cazul potențialului de acțiune, permeabilizarea este totală. În tabelul 3.II sunt comparate caracteristicile celor două moduri de răspuns.

TABELUL 3.II

Caracteristicile răspunsului local comparativ cu cele ale potențialului de acțiune

	Răspuns local	Potențial de acțiune
Stimul	subliminar	supraliminar
Mecanism	permeabilizare parțială la Na^+ locală, decremențială (electronică)	permeabilizare totală la Na^+ etc. la distanță, nedecrementială (activă)
Propagare	proporțională cu stimulul (răspuns gradat)	constantă la orice stimul supraliminar

Răspunsul local se caracterizează prin fenomenul de sumă temporală și spațială.

Aplicarea unor stimuli subliminari cu frecvență mare (la intervale scurte) determină, prin suprapunerea depolarizărilor succesive, răspunsul exploziv reprezentat de potențialul de acțiune. Același efect se obține dacă se aplică simultan stimuli subliminari în puncte foarte apropiate ale membranei (sumă spațială). În ambele cazuri, făcând abstracție de detalii ce vor fi redate mai jos, fenomenul se explică astfel: orice stimul depolarizant determină un răspuns în măsura în care este capabil să deschidă un număr de canale de sodiu în membrana neuronală. Suprapunerea în timp sau spațiu a deschiderii acestor canale permite atingerea momentului în care, în porțiunea stimulată, permeabilizarea este totală și se declanșează potențialul de acțiune.

3.1.1.4. Potențialul de acțiune: Teoria ionică

Atingerea pragului de excitație determină declanșarea unui fenomen membranal exploziv, a cărui expresie electrică este potențialul de acțiune. Înregistrarea detaliată, așa cum va fi descrisă mai jos, se realizează cu microelectrozi (metodă unipolară) la nivelul structurii nervoase elementare izolate (neuron sau fibră nervoasă). O reprezentare tipică a potențialului de acțiune înregistrat într-o fibră nervoasă este prezentată în fig. 3.5.

Cercetările realizate de Hodgkin, Huxley și Katz pe axoni giganți au dus la cunoașterea mecanismelor ionice ce stau la baza secvenței de fenomene electrice (teoria ionică a potențialului de acțiune). Fenomenele s-ar desfășura în ordine astfel:

- **perioada de latență:** reprezintă intervalul de timp dintre momentul stimulării și începutul potențialului de acțiune. Are o

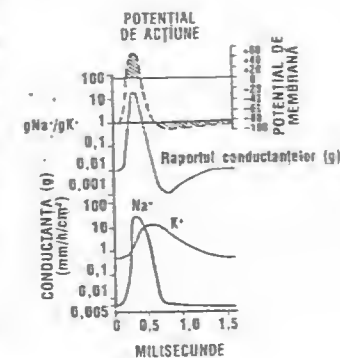


Fig. 3.5. Modificarea conductanțelor pentru Na^+ și K^+ în cursul potențialului de acțiune.

durată redusă (0,1 ms pentru majoritatea structurilor) și, în cursul său, potențialul de membrană se deplasează progresiv de la valoarea de repaus la valoarea pragului de excitație. În această perioadă, permeabilitatea membranei la ioni de Na^+ (conductanța la Na^+ exprimată în g_{Na^+}) crește rapid de la valoarea de repaus, apropiată de 0, la valori maxime, de câteva sute de ori mai mari;

- **depolarizarea:** după perioada de latență, influxul de avalanșă a ionilor de Na^+ determină o depolarizare totală a membranei, continuată cu o trecere în zona valorilor pozitive, denumită „overshoot”. Apare o deflexiune pozitivă, cu amplitudinea de cca 100–120 mV, ce atinge vârful în interval de aproximativ 1 ms;

- **repolarizarea rapidă:** acumularea masivă de Na^+ în interior acționează ca o frână, reducând la nivelul vârfului unde pătrunderea acestui ion. Ulterior, datorită închiderii automate a canalelor de sodiu, conductanța membranei pentru acest ion revine la valoarea de repaus. Ionii de Na^+ pătrunși rămân astfel fixați în interiorul celulei și potențialul se menține aproape de valoarea de vârf, până în momentul în care începe al doilea fenomen declanșat de excitație, și anume creșterea de 10–40 de ori a conductanței pentru K^+ . Ionii de K^+ , împinși de diferența de concentrație și încărcare, părăsesc celula. Acest fapt determină o revenire a potențialului spre zona valorilor negative (repolarizare). În structurile nervoase, conductanța la K^+ începe să crească la cca 1 ms după începutul potențialului de acțiune. Datorită acestui fapt, repolarizarea începe abrupt, chiar de la vârf (spike-potențial). În alte structuri (fibra miocardică), creșterea conductanței la K^+ începe cu o oarecare întârziere, fapt ce determină apariția unui platou de durată variabilă (vezi capitolul respectiv). Trebuie subliniat faptul că repolarizarea are loc prin ieșirea potasiului în condițiile în care raportul de concentrație ionică (Na^+/K^+) este inversat față de situația de repaus;

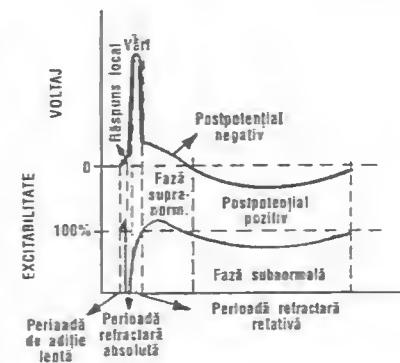
- **postpotențialul negativ:** reprezintă partea finală a repolarizării și se manifestă ca o întârziere a repolarizării ce devine mai lentă față de perioada inițială, rapidă. Acest postpotențial se datorează excesului de sodiu intracelular. Acest exces, menținut prin permeabilitatea scăzută față de ion, nu poate fi compensat rapid prin ieșirea K^+ , a căruia conductanța a atins deja valoarea maximă, începând să revină spre normal. Acest postpotențial durează în general câteva milisecunde și reprezintă cam 5% din valoarea spike-potențialului. La sfârșitul acestei perioade, compensarea excesului de sodiu se realizează prin două mecanisme. Primul este reprezentat de fenomenul de difuziune inică dinspre zona imediat adiacentă membranei spre restul citoplasmei. În acest mod se poate asigura revenirea la potențialul de repaus, chiar în absența unei evacuări a sodiului spre exterior. Având în vedere capacitatea intrinsecă limitată de încărcare cu sodiu a citoplasmei, pomparea activă a sodiului spre exterior este al doilea mecanism, mai lent, de „reîncărcare” a membranei excitabile;

- **postpotențialul pozitiv:** revenirea la valori de repaus a potențialului transmembranar la sfârșitul postpotențialului negativ este un fenomen tranzitoriu. Activitatea pompei ionice de Na^+/K^+ , în condițiile unui exces de sodiu intracelular și ale unei pierderi a potasiului, face ca evacuarea sodiului să determine un deficit intracelular tranzitoriu de sarcini pozitive. Acest deficit determină hiperpolarizarea membranei pe o durată de 80–100 ms. Acest postpotențial pozitiv are valori în general foarte reduse (maximum 1–2% din valoarea spike-potențialului). Faptul că este legat de activitatea de transport activ este subliniat de coincidența sa cu creșterea consumului energetic al nervului și cu degajarea de căldură.

3.1.1.5. Modificările excitabilității în cursul potențialului de acțiune

Un stimul atinge valoarea prag atunci când determină permeabilizarea totală la sodiu a membranei excitabile. În cursul perioadei de latență, când numărul canalelor de sodiu deschise crește treptat, membrana devine mai excitabilă decât în repaus. Durata scurtă a latenței face ca acest fenomen să aibă o valoare funcțională redusă. Mult mai importantă este **perioada refractară absolută**, care coincide cu perioada ascendentă și vârful potențialului de acțiune. Canalele de sodiu fiind deschise în totalitate, structura este incapabilă să răspundă la un alt stimul supraadăugat. În perioada repolarizării rapide, când permeabilitatea la sodiu scade la normal, reappare posibilitatea stimulării membranei prin deschiderea unor canale de sodiu. Această restabilire a excitabilității are loc însă în condițiile unei ieșiri rapide a K^+ , ce compensează în parte efectul depolarizant al intrării Na^+ . Datorită acestui fapt, atingerea pragului de excitație se face mai greu și la intensități de stimulare mai mari. Perioada se numește **refractară relativă** (fig. 3.6).

Fig. 3.6. Modificările excitabilității în cursul potențialului de acțiune.



În perioada postpotențialului negativ, datorită închiderii canalelor de sodiu și persistenței unei depolarizări a membranei, se realizează o stare de hiperexcitabilitate. Stimulul va atinge depolarizarea prag la intensități mai reduse. În cursul postpotențialului pozitiv, hiperpolarizarea membranei determină, din aceleași considerente, o stare de hipoexcitabilitate.

Potențialul de acțiune este un mijloc de informare privind durata și amplitudinea stimulării. Stimulii subliminari determină apariția răspunsurilor locale, care, nefiind propagate, pot juca un rol informațional doar în măsura în care realizează modificări ale excitabilității și conductibilității nervoase. Depășirea pragului de excitație determină apariția potențialului de acțiune, de durată și amplitudine invariabile, indiferent de natura, durata sau importanța stimulării. Potențialul de acțiune oferă informații doar privind apariția unui excitant supraliminar.

Dacă problema naturii stimulului este rezolvată prin existența receptorilor și căilor specifice senzitivo-senzoriale, semnalarea celorlalte caractere se realizează prin codificarea lor în frecvență.

Depolarizarea membranei neuronale generată de un stimul determină apariția unui potențial de acțiune, care prin însăși mecanismele sale este urmat de repolarizare. Dacă stimulul se prelungește pe o durată mai mare, atunci repolarizarea membranei este tranzitorie, fiind urmată de un nou potențial de acțiune.

Procesul se repetă cu o frecvență mai mare sau mai mică în funcție de intensitatea stimulării și pe toată durata sa. Prin urmare, celula nervoasă reacționează la stimulare trimițând în rețeaua neuronală trenuri (succesiuni) de potențiale de acțiune, al căror număr și frecvență transportă codificat informații asupra caracterelor stimulului. Pentru înțelegerea acestui fapt, Adrian a primit în 1932 premiul Nobel. Fenomenele de acomodare, electrotonus, precum și intervenția receptorilor și a sinapselor contribuie, prin modularea frecvenței, la îmbogățirea conținutului mesajului nervos.

3.1.1.6. Acomodarea și panta limită

În măsurarea excitabilității se utilizează întotdeauna stimuli rectangulari, a căror instalare este bruscă. Între bruschea stimulului și excitabilitate există o relație directă. La stimulări în care atingerea valorii maxime se face treptat, apare o scădere a excitabilității, denumită **acomodare**. Cu cât panta de instalare a curentului scade, cu atât crește pragul de excitație. Există o **pantă limită**, sub care pragul crește atât de mult, încât practic nu se poate obține un răspuns. Acest fenomen se explică prin prisma teoriei ionice a potențialului de acțiune. Pe măsură ce se instalează, se deschide un număr subliminar de canale de sodiu. Această deschidere durează însă un timp limitat și constant (timp de inactivare a canalului). Atunci când se atinge o valoare de stimulare egală cu aceea prag din cazul unei stimulări bruște, o parte din canalele de sodiu (cele deschise la început) sunt deja reînchise, astfel încât deschiderea totală se obține la un prag crescut. La acest fenomen contribuie și faptul că deschiderea canalului de sodiu este urmată la un interval invariabil de creșterea conductanței la potasiu. Alături de reînchiderea canalelor de Na^+ , efluxul de K^+ contribuie și el la creșterea pragului de excitație (acomodare).

3.1.1.7. Descărcarea repetitivă. Automatismul

Scăderea potențialului de membrană la valoarea prag determină declanșarea potențialului de acțiune. Acest fenomen a putut fi observat, de exemplu, în condițiile scăderii calciului extracelular (tetanie). S-a

arătat că ionii de calciu împiedică, prin competiție, pătrunderea ionilor de sodiu și depolarizarea membranei. În lipsa calciului, pătrunderea ionilor de sodiu determină o depolarizare progresivă, care în momentul atingerii pragului duce la apariția potențialului de acțiune. Declanșarea acestui potențial de acțiune este urmată, așa cum s-a văzut, de restabilirea valorilor de repaus ale potențialului transmembranar. La sfârșitul repolarizării, pătrunderea ionilor se reia și apare un nou potențial de acțiune ș.a.m.d. Astfel se explică hiperexcitabilitatea neuro-musculară observată în tetania hipoparatiroidiană sau de altă natură. Fenomenul de descărcare repetativă se observă și în mod normal, în cazul altor structuri excitabile zise automate (tesut autonom cardiac, *pacemaker*-ii din musculatura netedă viscerală, unii centri nervoși). În acest caz este vorba, de obicei, de o creștere prelungită sau permanentă a permeabilității membranei la sodiu. Cauzele acestei creșteri nu sunt cunoscute. Se presupune că ar fi vorba de o conformație particulară a membranei elementului respectiv. Cu cât permeabilitatea este mai mare, cu atât pătrunderea Na^+ este mai rapidă și frecvența impulsurilor automate mai mare. Adeseori este necesar, în vederea asigurării unei repolarizări complete, ca și creșterea permeabilității la K^+ generată de potențialul de acțiune să fie mai mare decât cea normală. Astfel apare, prin ieșirea K^+ , o stare de hiperpolarizare la nivelul membranei, ce asigură ritmul de descărcare. În absența acestei modificări, depolarizarea s-ar putea prelungi, neluând aspectul ritmic descris. Într-un astfel de sistem, în care pragul de excitație este practic foarte scăzut, un stimul extern unic poate genera un răspuns repetativ de frecvență și durată variabile.

3.1.1.8. Factorii ce scad excitabilitatea

În afara fenomenului de acomodare, excitabilitatea este scăzută și de anumite condiții particulare, cum ar fi:

- creșterea Ca^{2+} din mediu (scade permeabilitatea la Na^+);
- scăderea K^+ din mediu (hiperpolarizare); se întâlnește în așa-zisa paralizie familială periodică;
- utilizarea anesteziei locale, care reduc permeabilitatea membranei la sodiu (cocaină, tetracaină, procaină).

3.2. CONDUCTIBILITATEA

Proprietatea structurii nervoase de a conduce la distanță potențialul de acțiune generat de un stimul supraliminar se numește conductibilitate. Și această proprietate este, de fapt, un fenomen de membrană.

3.2.1. CONDUCEREA ÎN FIBRELE NERVOASE AMIELINICE

Faptul că fibrele nervoase conduc potențialul de acțiune a determinat compararea lor cu un cablu electric. De fapt, caracteristicile lor electrice, departe de a fi ideale (miezul conductor cu rezistență mare și învelișul izolator cu rezistență inefficientă), le face de 10^{11} ori mai puțin eficace decât orice cablu electric utilizabil. Posibilitatea de a conduce unde de depolarizare este conferită fibrelor nervoase de faptul că reprezintă un cablu electric, în a cărui structură sunt inserați, practic continuu, amplificatori biologici care susțin nedecremential amplitudinea potențialului condus. Acești amplificatori sunt reprezentați de joncțiunile de permeabilități ionice ce stă la baza apariției potențialului de acțiune.

Mecanismul conducerii influxului nervos se realizează prin așa-zii curenți locali, descriși pentru prima oară de Hermann (1879). În momentul producerii potențialului de acțiune, pe o anumită lungime a membranei („lungime de undă” a influxului nervos: 16–60 mm), are loc o inversare a potențialului de membrană. Pe fața internă a membranei, în zona respectivă apare, de exemplu, un potențial de +40 mV, în timp ce la numai câteva zecimi de milimetru potențialul este la valoarea de repaus – 80 mV. Sub acțiunea acestei diferențe de potențial, cationii transportori de sarcină migrează spre zona polarizată (în repaus) și, acumulându-se la acest nivel,

determină depolarizarea. Circuitul este completat prin membrană și mediul extracelular, unde sarcinile se vor deplasa dinspre regiunea aflată în repaus spre zona inițial depolarizată (fig. 3.7).



Fig. 3.7. Conducerea nervoasă. A: Curenți Hermann. B: Conducere saltatorie

În momentul în care depolarizarea realizată prin acest circuit local atinge pragul, se declanșează mecanismele ionice care generează un nou potențial de acțiune în zona imediat învecinată. În același timp, prin mecanismele repolarizării, în zona inițială se restabilește potențialul de repaus. În acest mod, potențialul de acțiune se propagă autoregenerativ și nedecremential din aproape în aproape.

Faptul că potențialul de acțiune propagat electrotonic pe distanțe scurte reprezintă un stimul supraliminar ridică problema modului în care este împiedicată transmiterea excitației și la alte fibre amielinice aflate adesea într-o intimă vecinătate (conducere izolată). Acest fapt se poate înțelege dacă se ține seama de faptul că, în zona de propagare, curentul este de tip catodic (depolarizant) pentru fibra nervoasă în cauză și anodic (hiperpolarizant) pentru fibrele nervoase învecinate.

Propagarea la aceste fibre devine posibilă doar în cazul lezării membranei (unele forme de nevralgie-cauzalgie).

Din mecanismul descris rezultă că, în fibra nervoasă, conducerea se realizează în ambele direcții (conducere indiferentă). Viteza de conducere depinde de distanța la care se poate propaga electrotonic potențialul de acțiune. Această distanță (constantă de spațiu) este proporțională cu „lungimea de undă” a influxului nervos și este în general foarte redusă. Din acest motiv, și viteza influxului nervos în fibrele amielinice este scăzută (de exemplu, 5 m/s în axoni cu diametru de 30 μm). Această viteză crește proporțional doar cu pătratul diametrului axonal. Unda de depolarizare este urmată în timpul conducerii de repolarizare. Frecvența conducerii nervoase depinde de rapiditatea cu care se produce repolarizarea membranei. Capacitatea de conducere revine imediat după încheierea perioadei refractare absolute (0.5 m/s) și nu necesită de fapt evacuarea instantanee și totală în mediul extracelular a ionilor de Na^+ pătrunși în cursul depolarizării (vezi mai sus). Din acest motiv, fibrele nervoase pot conduce stimuli cu o frecvență de sute și chiar 1–2 mii Hz. În comparație cu alte celule excitabile, neuronii motori au cea mai scurtă viteză de conducere a potențialului de acțiune (vezi fig. 3.4).

3.2.2. CONDUCEREA ÎN FIBRELE NERVOASE MIELINIZATE

Vitezele mari de conducere nervoasă sunt realizate la nivelul fibrelor nervoase mielinizate. Potențialul de acțiune se propagă saltatoriu, de la o strânguție Ranvier la următoarele (vezi fig. 3.7). Acest mod de propagare este determinat de existența unor diferențe importante între zona nodurilor și cea a internodurilor (tabelul 3.III).

TABELUL 3.III

Caracteristicile nodurilor și internodurilor în fibra nervoasă mielinizată

	Noduri	Internoduri
Mielina	absentă	prezentă
Prezența canalelor de Na^+	în număr mai mare ($\times 500$) decât în fibra amielinică	absente
Rezistența (relativă)	1	10
Capacitatea (relativă)	1000	1

Excitabilitatea crescută a nodurilor determină apariția cu ușurință a potențialelor de acțiune care se propagă electrotonic până la nodul următor. Faptul că internodul este impermeabil la sodiu, precum și capacitatea sa redusă limitează pierderile de amplitudine ale potențialului în cursul propagării electrotonice. În acest mod, depolarizarea ce „sare” la nodul următor rămâne suficientă (cel puțin 50%) pentru a declanșa amplificatorul nodal care generează un nou potențial de acțiune. Pierderea tecii de mielină sub acțiunea toxinei difterice sau în cazul sclerozei multiple duce la scăderea vitezei de propagare sau chiar pierderea capacității de conducere.

3.2.3. VITEZA DE CONDUCERE A INFLUXULUI NERVOȘ

Viteza de conducere a influxului nervos variază de la o fibră la alta în funcție de caracteristicile sale morfo-funcționale. Rezumând cele expuse mai sus, rezultă că dintre aceste caracteristici mai importante sunt următoarele:

- prezența tecii de mielină, care mărește cu mult viteza de conducere;
- diametrul fibrei; între diametrul fibrei și viteza de conducere există un raport constant pentru același tip de fibră și aceeași specie (6–7 pentru mamifere);
- lungimea internodului este direct proporțională cu viteza de conducere întrucât această lungime este condiționată de diametrul fibrei, și în această relație se găsește raportul diametru/viteză, deja discutat.

Legarea vitezei de conducere de caracteristicile structurale a permis clasificarea fibrelor nervase, prezentată în tabelul 3.IV.

S-au descris și alte deosebiri între diferitele tipuri de fibre. Astfel, fibrele tip A și tip B sunt mielinizate, spre deosebire de tipul C. Fibrele B, ce nu pot fi bine diferențiate de fibrele A delta, nu au postpotențial negativ și, în schimb, au un postpotențial pozitiv amplu care, prin hiperpolarizare, le reduce excitabilitatea. Diferențe similare există între fibrele s și d.

TABELUL 3.IV

Clasificarea funcțională a fibrelor nervase
(după Erlanger și Ganer)

Tipuri de fibră	Diametru (μm)	Viteză de conducere	Funcție
A alfa	10–20	60–120	Fibre motorii și aferente ale fusului muscular (propriocepție)
beta	7–15	40–90	Fibre de la receptori tactili cutanați (aunere, presiune)
gamma	4–8	30–45	Fibre eferente, intrafusale musculare
delta	2.5–5	15–25	Fibre de la receptori termici și nociceptivi
B	1–3	3–15	Fibre preganglionare
s	0.3–1.5	0.7–2.3	Fibre eferente postganglionare simplice
C d	0.3–1.5	0.6–2.0	Fibre eferente din rădăcina dorsală

3.2.4. POTENȚIALUL DE ACȚIUNE COMPUS. ELECTRONERVOGRAMA

Stimularea supraliminară simultană a tuturor fibrelor dintr-un trunchi nervos permite înregistrarea cu electrozi extracelulari a unui potențial de acțiune global, cu aspect complex, denumit *potențial de acțiune compus*. Pe măsură ce distanța dintre locul stimulării și locul înregistrării crește, se pot observa tot mai distinct o serie de componente, fiecare reprezentând transmiterea potențialului de acțiune prin grupuri de fibre cu viteze de conducere diferite.

La distanțe mari, utilizând diferențele de prag de excitație dintre diferitele tipuri de fibre, se pot separa complet și eticheta componentele acestui potențial. Se poate stabili astfel existența și funcționalitatea diferitelor tipuri de fibre în trunchiul nervos investigat.

3.2.5. FENOMENE METABOLICE CE ÎNSOȚESC CONDUCEREA ÎN FIBRA NERVOASĂ

Metabolismul de repaus al fibrei nervoase mielinizate este predominant aerob și furnizează cele 1,2 cal/g/h necesare întreținerii. La intrarea fibrei în activitate, consumul energetic crește cu 50%. În nervii amielinici, consumul este de trei ori mai mare. Substanța neuronală din creier consumă de 3–10 ori mai mult oxigen. În hipoxia prelungită, conducerea încetează datorită acumulării de acid lactic. Fibrele de tip B și A sunt cele mai sensibile.

Energia, obținută pe căile metabolice obișnuite din ATP și creatin fosfat resintetizate prin glicoliză, se utilizează în bună parte pentru menținerea gradientelor de concentrație ionică normale. Aceasta se realizează prin pompa metabolică de Na^+/K^+ . *Căldura de activitate* se degajă în două faze: *căldura inițială* (1% din căldura de repaus) și *căldura de restituție* (30% din căldura de repaus) ce apare tardiv, mai ales după încetarea stimulării.

3.2.6. OBOSEALA NERVOASĂ. INHIBIȚIA VEDENSKI

Stimularea de înaltă frecvență nu determină modificări ale conducerii, chiar atunci când se prelungește pe durate de ore. Frecvențele mari (peste 1 000 Hz) și prelungele determină creșteri ale perioadei refractare și scăderea numărului de impulsuri generate și conduse. Frecvența maximă de generare a potențialelor de acțiune într-un nerv a fost denumită labilitate funcțională a nervului în cauză (Vedenski). Depășirea acestei frecvențe de stimulare duce la apariția unor blocaje ale conducerii nervase (1/2, 1/3, 1/4 etc.), iar, la anumite valori foarte mari, poate apărea un blocaj complet pe toată perioada stimulării (fenomenul Vedenski de inhibiție prin excitație supraliminară).

3.3. TRANSMITEREA SINAPTICĂ

Conceptul de sinapsă ca zonă de contact și transmitere de informații de la un neuron la altul, introdus în urmă cu peste 100 de ani (Sherrington, 1897), a fost extins ulterior la toate articulațiile interneuronale și neuro-efectoare sub denumirea generică de transmitere sinaptică. Atât transferul interneuronal de informații, cât și cel de la nivelul joncțiunilor neuro-efectoare prezintă anumite particularități structurale și funcționale în funcție de prezența și tipul sinapselor excitatorii sau inhibitorii în scară animală.

3.3.1. PARTICULARITĂȚILE MORFO-FUNCȚIONALE ALE SINAPSELOR

Ca formă specializată de comunicare intercelulară, sinapsele sunt constituite din structuri presinaptice, postsinaptice și spațiul joncțional intercelular, denumit fantă sinaptică.

După elementele celulare care vin în contact sinaptic, sinapsele pot fi:

– neuro-neuronale de diferite tipuri: axo-somatic, axo-axonale, axo-dendritice, dendro-dendritice (fig. 3.8);

– neuro-efectoare – între neuroni și fibre musculare striate sau netede

– neuro-glandulare – între neuroni și diferite celule glandulare endocrine sau exocrine.

Relațiile interneuronale pot fi convergente sau divergente, după numărul terminațiilor axonale ale unuia sau mai multor neuroni presinaptici se articulează cu unul sau mai mulți neuroni postsinaptici. Răspunsul postsinaptic de tip excitator sau inhibitor depinde de efectul depolarizant sau hiperpolarizant al neurotransmițătorului purtător de informație presinaptică.

La mamifere și om predomină conexiunile sinaptice chimice, realizând transmiterea mesajelor neuronale presinaptice pe cale umorală prin intermediul mediatorilor chimici excitatori sau inhibitorii.

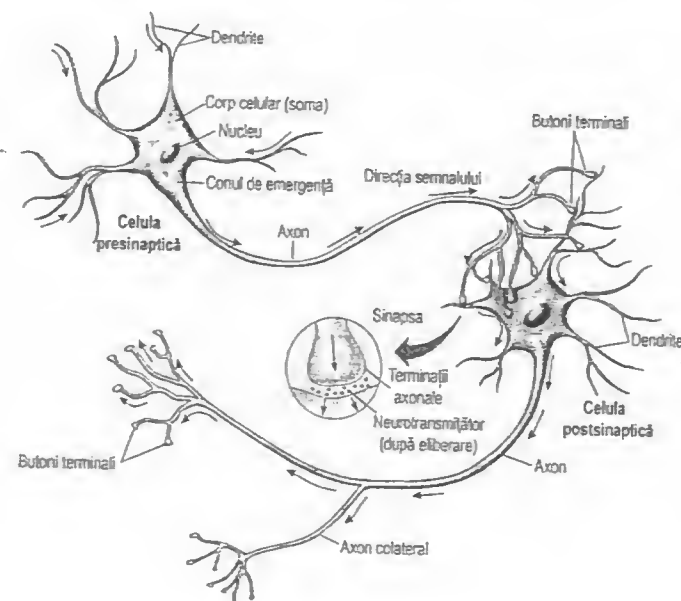


Fig. 3.8. Principalele elemente componente ale unei sinapse interneuronale.

Excepție fac doar sinapsele electrice cu neurotransmitere rapidă, datorită comunicării directe între citoplasma celor doi neuroni prin jonctiunile strânse (*gap-junctions*) lipsite de fântă sinaptică.

Sinapsele chimice, ca zone de contact funcțional interneuronal sau neuro-efector, sunt alcătuite din terminațiile axonale ale neuronului presinaptic și elementele componente ale teritoriului postsinaptic (neuronal sau organe efectoare) separate de spațiul sau fanta sinaptică. În timp ce regiunea presinaptică este reprezentată de butonii sinaptici sau varicozitățile unor terminații axonale liberatoare de mediatori chimici specifici, teritoriul postsinaptic neuronal sau efector este bogat în receptori și canale ionice ale zonei dense membranare generatoare de reacții electro-chimice și răspunsuri specifice celulare.

Atât butonii terminali sinaptici, cât și varicozitățile terminațiilor nervoase presinaptice conțin vezicule sinaptice în care sunt stocate substanțele chimice necesare transmiterii mesajului nervos din teritoriul presinaptic în cel postsinaptic.

Forma, densitatea și dimensiunile acestor vezicule variază în funcție de mediatorul chimic și starea funcțională a teritoriului sinaptic respectiv. De exemplu, veziculele sinaptice omogene de formă circulară, cu diametrul de 500–600 Å și densitate slabă sunt locul de depozitare a acetilcolinei. Veziculele mici, dens granulate, cu diametrul de 200–400 Å conțin noradrenalină.

Principalele componente ale teritoriului presinaptic sunt ilustrate în figura următoare (fig. 3.9).

La rândul său, fanta sinaptică de 20–30 nm (200–300 Å) existentă între membranele pre- și postsinaptice asigură prin filamentele dense intermembranare adezivitate, unidirecționalitatea și ghidajul, precum și difuziunea substanței mediatore eliberate sub influența manifestărilor electro-chimice presinaptice spre teritoriul postsinaptic.

Ca traductor de informații, receptori postsinaptici de la nivelul membranei postsinaptice preiau mesajele excitatorii sau inhibitorii transmise din teritoriul presinaptic de către mediatorii chimici, determinând

transmiterea informației și răspunsul corespunzător excitator sau inhibitor din partea teritoriului postsinaptic. Semnalele electrice transmembranare modulate în frecvență sub formă de influx nervos sunt transmise cu latență de 0,3–0,5 ms de la nivelul terminațiilor presinaptice în teritoriul postsinaptic, cu participarea obligatorie a ionilor de calciu ca factor de spargere a veziculelor sinaptice și eliberare a neurotransmițătorului excitator sau inhibitor.

Fenomenele de transmitere și transducție a informațiilor, având o perioadă de latență mare (0,3–0,5 ms), realizează fenomenul de „întârziere sinaptică” prin procese de cuplare electro-chimică proprii teritoriului presinaptic și postsinaptic.

Ajuns la nivelul terminațiilor axonale, potențialul de acțiune, ca manifestare electrică membranară autopropagată, determină eliberarea neurotransmițătorului în fanta sinaptică, combinarea cu receptori membranari postsinaptici, creșterea sau scăderea permeabilității ionice selective și transformarea potențialului postsinaptic de repaus în potențial de acțiune depolarizant de tip excitator (PPSE) sau de tip hiperpolarizant inhibitor (PPSI). Ambele fenomene se produc prin însumare temporală și spațială a potențialelor postsinaptice locale, realizând ca un macaz comutarea și transmiterea în sens anterograd a impulsului nervos excitator sau inhibitor.

Etapile eliberării din teritoriul presinaptic și realizării efectelor mediatorului chimic la nivel postsinaptic sunt în linii mari următoarele:

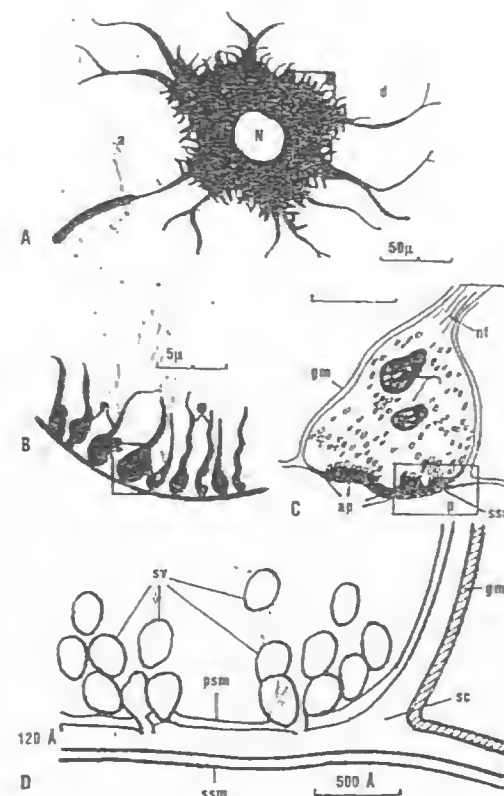
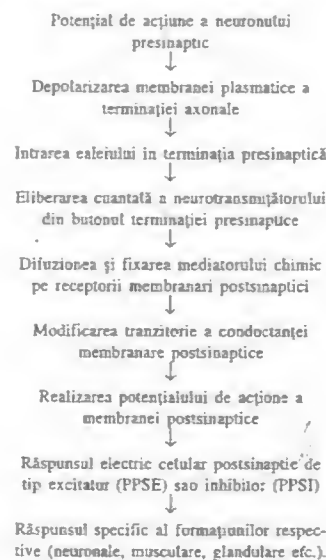


Fig. 3.9. Microscopia optică (A, B) și electronică (C, D) a butonului sinaptic. N, nucleul neuronului. a, axon. d, dendrite. n.f., neurofibrile. gm., membrana externă. ap., aparat presinaptic. p., spațiu postsinaptic. ssm., membrana subsinaptică. sv., vezicula sinaptică. sc., spațiu intersinaptic. psm., membrana presinaptică.

Realizând o adevărată cascadă de evenimente fizico-chimice specifice teritoriilor pre- și postsinapțice, sinapsele chimice se particularizează prin perioada mare de latență, participarea ionului de calciu la eliberarea cuantală a substanței mediatore din butonii terminali presinapțici și restabilirea manifestărilor electrice membranare generatoare de răspunsuri specifice postsinapțice celulare.

În funcție de tipul răspunsului postsinaptic realizat de către mediatorul specific, sinapsele se împart în excitatorii și inhibitorii. Ca exemplu poate fi dat cazul glutamatului, ca mediator chimic al sinapselor excitatorii, și al GABA, pentru sinapsele inhibitorii. Ansamblul fenomenelor electro-chimice de la nivelul celor trei segmente implicate în transmiterea sinaptică chimică este în linii mari următorul (fig. 3.10):

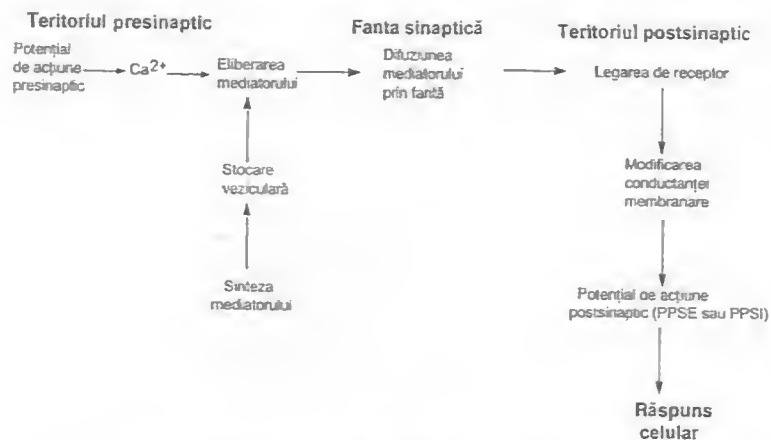


Fig. 3.10. Ansamblul fenomenelor electro-chimice de la nivelul teritoriului sinaptic.

Spre deosebire de sinapsele chimice, care se caracterizează prin latență mare și unidirecționalitatea răspunsului, sinapsele electrice realizează neurotransmiserea bidirecțională rapidă de mesaje datorită comunicării directe între citoplasma celor doi neuroni prin joncțiunile strânse (*gap-junction*) lipsite de fantă sinaptică. Din punct de vedere structural, sinapsele electrice, denumite și joncțiuni comunicante, conțin un canal constituit din 6 subunități de conexină ce formează un conexon funcțional. Aceste particularități structurale permit schimburi ionice interneuronale rapide, generatoare de manifestări electrice cu latență foarte mică (sub 0,1 ms) și viteză mare de transmitere a potențialului de acțiune.

La animalele inferioare și în câteva structuri nervoase subcorticale (nucleii bazali, nucleul vestibular lateral) predomină sinapsele electrice formate din segmente suprapuse ale membranelor plasmalemale.

Asemenea joncțiuni strânse de tip *gap-junction* (efapse) se întâlnesc și în unele celule non-neuronale (cardiomiocite, hepatocite, celule musculare netede intestinale, celule epiteliale ale cristalinului).

În general, sinapsele electrice asigură transmiterea rapidă a semnalelor între celulele apropiate, fiind necesare pentru sincronizarea răspunsului acestora. Unii neuroni posedă concomitent atât sinapse electrice, cât și sinapse chimice. Acestea asigură principalele forme de activitate ale organismului începând cu funcțiile neuromotorii, senzitivo-senzoriale și psiho-afective centrale și sfârșind cu cele neuro-efectoare periferice. Participarea lor la transferul de informații prin joncțiunile sinaptice centrale și periferice depinde în cazul sinapselor chimice, de integritatea proceselor de biosinteză, stocare, eliberare și acțiune a neurotransmițătorilor respectivi. În funcție de natura chimică a neurotransmițătorilor, sinapsele se împart în colinergice, adrenergice, serotoninerice, histaminice, amino-tergice, peptidergice, purinergice.

3.3.2. BIOSINTEZA ȘI ELIBERAREA SUBSTANȚELOR MEDIATOARE

Biosinteza substanțelor mediatore are loc fie în zona neuronală, fie la nivelul terminațiilor axonale din precursori specifici cu ajutorul unor enzime proprii mediatorului respectiv. Migrarea substanței mediatore rezultate se realizează sub formă liberă sau veziculară prin transport anterograd până la nivelul butonului terminal.

Conținutul butonilor sinapțici în mediatori chimici depinde nu numai de intensitatea proceselor de biosinteză a acestora, ci și de capacitatea lor de stocare și recaptare a mediatorului din mediul extracelular.

Stocarea substanțelor sintetizate sau recaptate în teritoriul presinaptic se realizează în veziculele butonului sinaptic. O mică fracție (aproximativ 1%) rămâne în citoplasmă, reprezentând compartimentul labil al mediatorului implicat în producerea potențialelor sinaptice miniaturale.

Eliberarea mediatorului chimic are loc sub influența potențialului electric de acțiune ajuns la nivelul butonului terminal printr-un mecanism insuficient precizat. În prezent se descriu două modalități de eliberare. Prima modalitate este reprezentată de eliberarea cuantală. Cuanțele sunt pachete echimoleculare de substanță mediatore stocate în veziculele sinaptice. În condiții de repaus, eliberarea se produce sub forma unor pachete cu un număr constant de molecule, determinând polarizări sau hiperpolarizări de mică amplitudine. În stare de activitate, ritmul eliberării crește, depolarizările cuantale se sumează, atingând pragul de excitație declanșator al potențialului de acțiune postsinaptic.

O altă alternativă pune fenomenul eliberării substanțelor mediatore pe seama fuziunii protinelor din membranele veziculară și citoplasmatică formatoare de pori, cu participarea sinaptoporinei din membrana veziculelor sinaptice și a fosfolinei din cea plasmatică, precum și a ionilor de calciu indispensabili descărcării prin exocitoză a conținutului veziculelor în spațiul sinaptic (fig. 3.11).

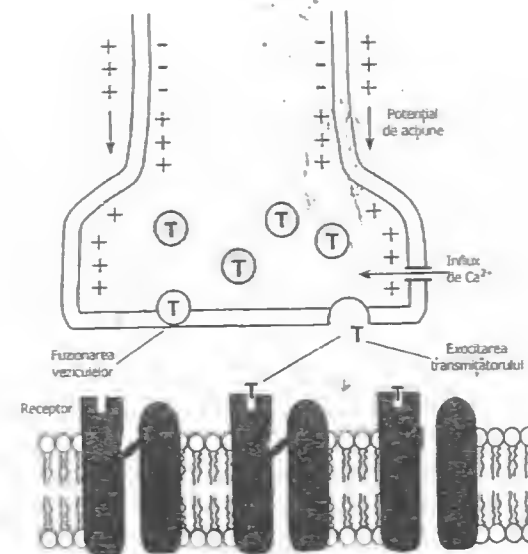


Fig. 3.11. Diagrama stocării și eliberării neurotransmițătorului.

După eliberare, în fanta sinaptică mediatorii chimici difuzează spre receptorii specifici și canalele ionice ale membranei plasmatice postsinaptice.

În cazul sinapselor din sistemul nervos central s-a descris o zonă postsinaptică densă, bogată în proteine implicate în plasticitatea neuronală și memorare. Astfel, în afara manifestărilor electro-chimice postsinaptice generatoare de răspunsuri electrice și funcționale specifice, mediatorii chimici contribuie pe plan structural și metabolic la formarea spinilor dendritici și stocarea informațiilor memorate.

O parte din membranele veziculelor sinaptice exocitate este recuperată prin endocitoză, intrând în procesul de reciclare și încărcare cu substanță mediatoră pentru a reface rezerva veziculară lângă zona activă. La procesul de endocitoză participă atât clathrina de la suprafața veziculelor sinaptice, cât și diuamina, o proteină de legare a microtubulilor, fosforilată de protein kinaza C și desfosforilată când sinaptosomi (terminații nervoase conținătoare de butoni sinaptici) sunt depolarizați.

Receptorii sinaptici sunt traductori de informații specifice mediatorului chimic transmise teritoriului membranal postsinaptic.

La mamifere și om, receptorii specifici neurotransmițătorilor sinaptici sunt de două feluri: ionotropi și metabotropi. Ei se diferențiază prin structură, mod de acțiune asupra permeabilității membranare și rapidității efectelor celulare. Receptorii ionotropi sunt de regulă polimeri legați la un canal ionic prevăzut cu efecte rapide. Aceștia prezintă un pol de recunoaștere pe fața externă a membranei celulare și un pol efector pe fața internă citoplasmatică, cu rol declanșator al răspunsului postsinaptic la informația receptată (fig. 3.12).

Receptorii metabotropi sunt monomeri cuplați cu o proteină membranară (proteina G) de transducere producătoare de efecte postsinaptice lente. Canalele ionice afectate nefind în vecinătatea receptorului, acțiunea asupra permeabilității membranare se realizează mai lent (în secunde sau minute). În timp ce receptorii ionotropi determină răspunsuri postsinaptice prompte și de scurtă durată (de ordinul milisecundelor), receptorii metabotropi, fiind mai lenți, servesc la modularea excitabilității sinaptice, indispensabile reacțiilor adecvate postsinaptice. În general, receptorii sunt cei care determină răspunsul sinaptic de tip excitator sau inhibitor. În aceeași sinapsă pot exista două sau mai multe tipuri de receptori, a căror activare de către neurotransmițători devine necesară realizării unei anumite funcții. Neurotransmițătorii îndeplinesc rol de liganzi endogeni, fiziologici, spre deosebire de liganzi exogeni, farmacologici.

Acțiunile liganzilor sunt agoniste sau antagoniste, după cum antrenează activarea receptorului sau se opun efectelor produse de către agonist. Există mai multe tipuri sau subtipuri de receptori pentru ligand, precum și mai mulți liganzi pentru aceleași situsuri receptoare.

Transformarea mesajului sinaptic de către ligand în răspuns biologic este obținută fie prin cuplaj direct între receptor și canalul ionic membranal, în cazul receptorilor ionotropi, fie prin cuplaj indirect prin intermediul proteinei G, în cazul receptorilor metabotropi sau al canalului de calciu și calmodulinei ca factor de cuplare a excitației cu contracția cardiacă (exemplu, mușchiul cardiac). De precizat că mecanismul de transducție prin cele 5 calmoduline descoperite până în prezent

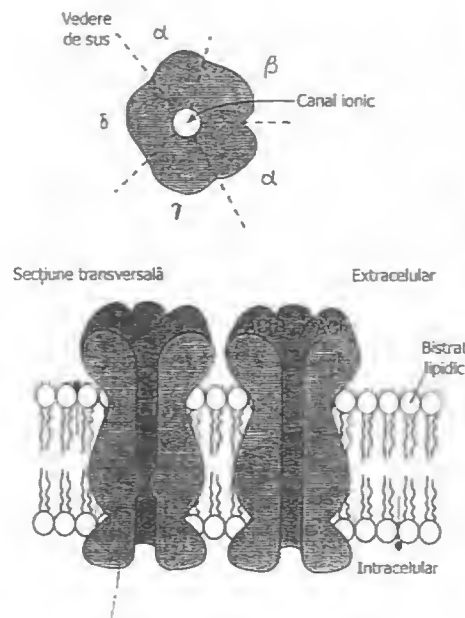


Fig. 3.12. Ultrastructura unui canal ionic receptor-dependent (receptor nicotinic).

depășește cadrul limitat al neurotransmiterii sinaptice și se integrează în procesele generale ale fiziologiei celulare.

3.3.3. MANIFESTĂRI ELECTRO-CHIMICE POSTSINAPTICE

Ca urmare a activării directe sau indirecte a canalelor ionice de Na^+ , K^+ și Cl^- de către receptori specifici diverselor substanțe neurotransmițătoare apar modificările electro-chimice membranare generatoare de potențiale de acțiune postsinaptice de tip depolarizant (excitator) sau hiperpolarizant (inhibitor). La baza lor stau schimburi ionice determinate de activarea sau inhibarea receptorilor membranari postsinaptici, însoțite de modificări ale permeabilității (conductanței), excitabilității și polarizării membranare generatoare de apariția potențialului de acțiune în momentul atingerii pragului de excitație a membranei respective (fig. 3.13).

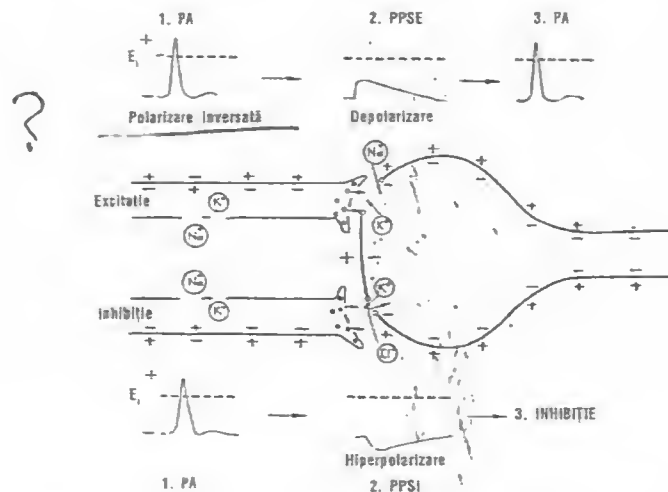


Fig. 3.13. Fenomene electro-chimice ale sinapselor excitatorii și inhibitorii.

După cum se știe, concentrația intra- și extracelulară a principalilor ioni diferă în funcție de starea de repaus sau de activitate a celulelor excitabile. Predominanța extracelulară a Na^+ și Cl^- dublată de cea a K^+ intracelular asigură potențialul electric membranar de repaus al pompei active $\text{Na}^+, \text{K}^+ \text{-ATPaza}$, folosind ATP ca principal substrat energetic. Sub influența neurotransmițătorului, se produce deschiderea canalelor ionice, modificarea permeabilității și încărcări electrice membranare.

Proprietățile fundamentale ale potențialelor postsinaptice sunt nepropagarea și sumația. Amplitudinea sa scade progresiv, odată cu îndepărtarea punctului de origine a fenomenului electric. În timp ce potențialul postsinaptic nu se propagă la structurile din afara teritoriului sinaptic, sumația constă în cumulara efectelor membranare produse de două sau mai multe potențiale postsinaptice. Există o sumație temporală care se produce prin activări succesive ale aceluiași potențial și o sumație spațială care survine în urma activării concomitente a două sau mai multe potențiale membranare.

3.3.4. MEDIAȚIA CHIMICĂ SINAPTICĂ

Transmiterea influxului nervos de la un neuron la altul sau de la celula nervoasă la organul efector se realizează în majoritatea cazurilor cu participarea obligatorie a mediatorilor chimici. Ca purtători umorali de informații nervoase specifice, mediatorii chimici sunt substanțe bioactive, cu greutate moleculară mică, ce asigură transferul mesajelor electrice din teritoriul presinaptic în cel postsinaptic. Dovezi experimentale directe privind transmiterea chimică a informațiilor la nivelul articulațiilor sinaptice au fost obținute inițial asupra unor structuri neuro-efectoare periferice, pentru ca ulterior să fie extinse la nivel interneuronar ganglionar și cerebro-spinal.

Stimulând nervul vag al unui cord izolat de broască, O. Loewi (1921) a constatat apariția în lichidul de perfuzie a unei substanțe ce inhibă activitatea contractilă a unui al doilea cord perfuzat. Substanța vagală cardioinhibitoare fiind identificată cu acetilcolina, experimentele au continuat pe același model experimental asupra fibrelor sinaptice cardiace, constatându-se eliberarea, în timpul stimulării electrice a acestora, a unei substanțe cardioacceleratoare de tip adrenalinic, denumită inițial simpatică. Descoperirea acetilcolinei și adrenalinei (simpatică) eliberate sub influența stimulării vago-simpatice stă la baza conceptului actual de mediație colinergică (parasimpatică) și adrenergică (simpatică). Ulterior s-au întreprins cercetări sistematice asupra mediației colinergice și adrenergice din alte teritorii, inclusiv centrale. S-a precizat, printre altele, că, în afara acetilcolinei și noradrenalinei ca principalii neurotransmițători simpatico-parasimpatici, numeroase alte substanțe biologice active îndeplinesc rol de mediatorii chimici ai influxului nervos excitator sau inhibitor. În prezent, peste 40 de substanțe endogene sunt considerate ca neurotransmițători cerți sau potențiali. Din această categorie fac parte o gamă variată de substanțe bioactive aparținând mediației chimice colinergice, adrenergice, serotoninergice, histaminergice, aminoacidergice, peptidergice, purinergice etc. O parte dintre acestea, precum și alte substanțe endogene îndeplinesc rol de cotransmițători sau neuromodulatori sinaptici.

În ultimii ani au apărut dovezi experimentale în favoarea existenței unei mediații chimice gazoase, având ca mediatorii chimici oxidul nitric și monoxidul de carbon implicați atât în neurotransmiterea anterogradă, cât și în cea retrogradă. Fiind gaze ușor difuzibile prin membranele celulare, acestea sunt implicate și în comunicarea interneuronară non-sinaptică simplă prin difuziune atât centrală, cât și periferică.

În cele ce urmează vor fi succint expuse substanțele biologice active cu statut cert sau potențial de mediatorii chimici sau de neuromodulatori ai răspunsurilor celulare postsinaptice. Principalele substanțe endogene care își dispută candidatura la calitatea de mediator chimic și/sau modulator sinaptic sunt prezentate în tabelul următor (tabelul 3.V).

TABELUL 3.V

Ansamblul substanțelor prevăzute cu proprietăți sinaptice mediatore sau modulatorie

1. Acetilcolină
2. Amine biogene
 - Calcicolamine: dopamina, noradrenalina, adrenalina
 - Serotonina (5-hidroxitriptamina)
 - Histamina
3. Acizi aminoai
 - Excitatori: glutamat, aspartat
 - Inhibitori:
 - Acid gamma-aminobutiric (GABA)
 - Glicina, taurina
4. Neuropeptide
 - Substanța P
 - Peptide opioide (endorfine, enkefaline, dinorfin)
 - Peptidul intestinal vasoactiv (VIP)
 - Neurotensina, neuropeptidul Y (NPY)
 - Peptidul genei calcitoninei (CGRP)
 - Neurokinina, bradikina

- Bombezina, motilina, gastrina
- Somatostatina, hormonul eliberator de gonadotropină (GnRH)
- Hormonul de eliberare a hormonului de creștere (GhRH)
- Hormonul adrenocorticotrop (ACTH), vasopresina, oxitocina
- Hormonul eliberator de tireostimulină (TRH)
- Colecistokina, gastrina, glucagonul
- Galanina, timozina, angiotensina, interleukina-1 (IL-1)
- Peptidele histidin-izoleucina (PHI) și histidin-metionina (PHM)
- 5. Steroizi - Prostaglandine
 - Cortizol și alți glucocorticoizi
 - Estrogeni și progesteron
 - Testosteron și aldosteron
- 6. Nucleotide - Adenozină
 - Adenozin monofosfat (AMP) și difosfat (ADP)
 - Adenozin trifosfat (ATP)
- 7. Gaze
 - Oxid nitric
 - Oxid de carbon

Nu toate aceste substanțe îndeplinesc condițiile de bază ale unui neurotransmițător. Multe dintre acestea au rol multiplu de neurohormoni cotransmițători sau de simpli modulatori sinaptici, în funcție de teritoriul asupra căruia acționează.

Criteriile pe care o substanță oarecare trebuie să le îndeplinească pentru a putea fi considerată mediator chimic sunt următoarele:

- substanța trebuie să fie prezentă în terminația presinaptică;
- teritoriul presinaptic să conțină precursorii și enzimele necesare sintezei mediatorului;
- stimularea neuronului presinaptic să determine eliberarea mediatorului chimic;
- să existe receptori postsinaptici cu afinitate pentru substanța mediatore;
- aplicarea substanței respective în teritoriul postsinaptic să antreneze același efect ca stimularea directă a acestuia;
- să existe mecanismul enzimatic de inactivare rapidă a neurotransmițătorului în teritoriul sinaptic;
- antagoniștii specifici să blocheze acțiunea sinaptică a substanței mediatore.

Referitor la coexistența mediatorilor chimici în aceeași articulație sinaptică cu cotransmițătorii respectivi, este de precizat că, în cortexul cerebral, măduvă și punte, acetilcolina coexistă în aceeași articulație sinaptică cu substanța P, VIP sau cu una din enkefaline, în locus coeruleus și ganglionii simpatici noradrenalina se găsește împreună cu neuropeptidul NPY, în timp ce GABA din talamus și cortexul cerebral folosește drept cotransmițător fie colecistokinina, fie somatostatina.

Recent s-a demonstrat că unele celule gliale interacționează cu neuronii, contribuind la reglarea neurotransmiterii sinaptice. Celulele gliale răspund la activitatea neuronală intensă cu o creștere a concentrației calciului necesar eliberării mediatorului chimic din butonul sinaptic. Ca parteneri activi ai sinapsei, astrocitele și celulele Schwann primesc semnale de la nivelul neuronului presinaptic și răspund prin eliberare crescută de calciu, realizând un adevărat mecanism de *feed-back* la nivelul triplei glie - buton presinaptic - membrană postsinaptică.

1. **Acetilcolina. Distribuție.** Descoperirea inițială în lichidul de perfuzie a inimii izolate de broască și mamifere a fost urmată de identificarea acesteia ca mediator chimic la nivelul plăcii neuro-musculare, fibrelor vegetative simpatico-parasimpatice preganglionare și parasimpatice postganglionare, denumite generic colinergice. Prezența acetilcolinei a fost constatată ulterior și la nivelul unor terminații simpatiche postganglionare, cum sunt cele care inervează glandele sudoripare și vasele musculaturii striate, precum și cele de la nivel cerebro-spinal.

În sistemul nervos central acetilcolina este fie difuz distribuită la nivel cortico-subcortico-spinal, fie sub formă de nuclei cu structură și funcții distincte (nucleii bazali, cuneiform, al septului, nucleul bazal al lui Meynert etc.). Acestea sunt principalele formațiuni centrale și periferice prevăzute cu capacitatea de a sintetiza și elibera acetilcolină, care, la rândul său, reproduce efectele stimulării nervoase specifice fibrelor colinergice.

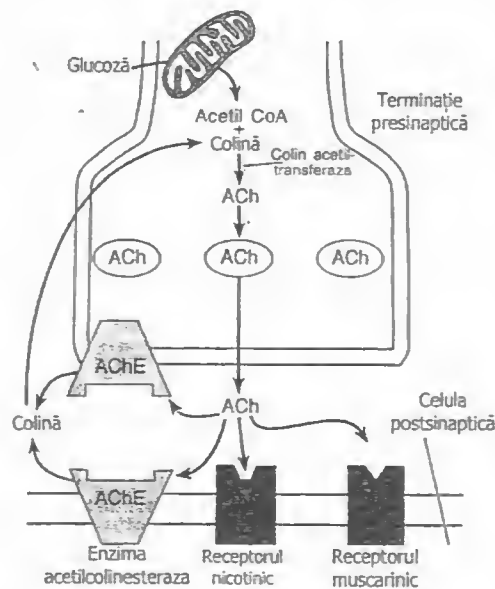


Fig. 3.14. Biosinteza și eliberarea acetilcolinei la nivel sinaptic.

eliberatoare de potențiale sinaptice miniaturale. Depolarizarea terminațiilor nervoase colinergice crește influxul de calciu în butonii sinaptici, determinând concentrarea intracelulară a acestuia și fixarea pe membrana veziculelor, urmată de fuziunea lor cu teritoriul membranal presinaptic în vederea eliberării prin exocitoză. După eliberare, acetilcolina este rapid inactivată prin distrugere enzimatică de către acetilcolinesterază (AChE), ca urmare a scindării în acid acetic și colină. Aceasta este recaptată de către butonul sinaptic în vederea refacerii stocului necesar biosintezei locale de acetilcolină. Fiecare moleculă de enzimă inactivează 5 000 de molecule de acetilcolină. Hidroliza rapidă a acetilcolinei permite repetarea cu frecvențe mari a transmiterii sinaptice colinergice. Îndepărtarea prin captare a acetilcolinei din fanta sinaptică poate fi evidențiată numai în prezența substanțelor anticolinesteraze.

Acțiuni fizio-farmacologice. După traversarea spațiului sinaptic, acetilcolina eliberată din butonii terminali se cuplează stereospecific cu receptori colinergici din membrana postsinaptică, producând modificări de permeabilitate generatoare de manifestări electro-chimice urmate de răspunsuri specifice ale celulelor țintă.

Receptorii colinergici sunt de două tipuri: nicotinici și muscarinici, după cum sunt activați specific de către nicotină sau muscarină. Spre deosebire de receptorii nicotinici, care sunt receptori ionotropi predominant la nivelul joncțiunilor neuro-musculare (plăcilor motorii), receptorii muscarinici sunt receptori metabotropi prezenți mai ales la nivelul sinapselor parasimpatice periferice și în sistemul nervos central.

Din punct de vedere structural, receptorul nicotinic este un pentamer glicoproteic cu greutate moleculară de 295 kilodaltoni, compus din cinci subunități aranjate cilindric în jurul unui canal central cu conductanță ridicată prin care trec cu ușurință și cu viteză mare ioni de Na^+ , K^+ și Ca^{2+} . După locul de distribuție și de fixare pe situsurile active ale receptorilor nicotinici, aceștia sunt împărțiți în receptori N_1 ganglionari și N_2

Biosinteza acetilcolinei. Capacitatea țesutului nervos de a sintetiza acetilcolină depinde de prezența enzimei colin acetilaza care catalizează reacția colină + acetil CoA în vederea formării acesteia la nivelul terminațiilor nervoase colinergice (fig. 3.14).

Enzima colin acetilaza (colin acetiltransferaza) este sintetizată în corpul neuronal (pericariion) și transportată de fluxul axoplasmatic la nivelul terminațiilor nervoase, unde devine activă. La rândul lor, cei doi precursori ai acetilcolinei, reprezentați de colină și acetatul activ din structura complexă a acetil coenzimei A, sunt furnizați de mitocondrii în cazul acetil CoA rezultată din metabolizarea glucozei și transportul membranal în cazul colinei plasmatice.

Acetilcolina sintetizată este stocată în vezicule sferice ale butonului sinaptic. Fiecare veziculă conține aproximativ 100 000 de molecule de acetilcolină. În afara compartimentului vezicular „de rezervă”, mici cantități de acetilcolină se găsesc sub formă liberă, constituind compartimentul citoplasmatic „funcțional” ușor eliberabil.

Eliberarea acetilcolinei. Se realizează fie sub formă cuantală, în cazul stocului vezicular, fie necuantal, în cazul eliberării spontane. Forma liberă necuantală este

musculari. La rândul lor, canalele ionice pentru acetilcolină sunt de două feluri: voltaj- și receptor-dependente (fig. 3.15).

Durata deschiderii canalului receptor este de aproximativ 10 miliseconde, timp în care se realizează depolarizarea membranală. Alți agonisți, precum succinilcolina sau decanetoniul utilizați în anestezie, prezintă o acțiune depolarizantă de lungă durată dublată de areactivitate musculară. O proteină submembranară denumită rapsină asigură concentrația receptorilor nicotinici în teritoriul postsinaptic.

Receptorii muscarinici sunt glicoproteine cu greutate moleculară de 80 000 daltoni. Până în prezent au fost identificate 5 subtipuri de receptori muscarinici: M_1 , M_2 , M_3 , M_4 și M_5 . Spre deosebire de receptorii M_2 și M_4 , care inhibă adenilat ciclaza și sinteza de cAMP, receptorii M_1 , M_3 și M_5 stimulează fosfolipaza C formatoare de inozitol trifosfat (IP_3) eliberator de Ca^{2+} .

Referitor la distribuția receptorilor muscarinici s-a stabilit că receptorii M_1 se găsesc în ganglionii vegetativi și glandele secretorii, receptorii M_2 predomină în miocard și celulele endoteliului vascular eliberator de NO, în timp ce receptorii M_3 sunt localizați în musculatura netedă viscerală. În creier au fost identificate toate cele cinci subtipuri de receptori muscarinici. În general, majoritatea țesuturilor și organelor conțin mai multe subtipuri, stimularea lor inducând numeroase efecte vegetative: bradicardie, vasodilatație, secreții salivare și mucoase, sudație, mioză, creșterea peristaltismului gastro-intestinal etc.

La baza acestora stau fie interacțiunile cu componentele proteinelor G, fie stimularea căii fosfatidil-inozitolului formatoare de IP_3 și DAG sau a căii GTP-dependente, formatore de cGMP ca mesager secund.

La rândul lor, sinapsele interneuronale centrale și ganglionare, prezentând atât receptori nicotinici, cât și muscarinici pot fi activate sau inhibitate de către acetilcolină în funcție de densitatea acestora și reactivitatea neuronilor respectivi.

Stările demențiale prezintă în multe cazuri reducerea transmiterii colinergice centrale. Tipic este cazul bolii Alzheimer, care are la bază, printre altele, alterarea performanțelor cognitive de natură colinergică de către plăcile amiloide senile producătoare de degenerescență neurofibrilară.

2. Amine biogene. Catecolaminele. Transmiterea impulsurilor nervoase simpatico-adrenergice se realizează cu ajutorul catecolaminelor reprezentate de noradrenalină, adrenalină și dopamină. Acestea sunt substanțe biologice active cu nucleu catecolaminic comun, rezultate din metabolizarea succesivă a tirozinei până la stadiul final de adrenalină (fig. 3.16).

Noradrenalina și adrenalina. În timp ce adrenalina îndeplinește rol predominant de hormon medulosuprarenal, noradrenalina și dopamina sunt adevărați mediatori chimici simpatico-adrenergici.

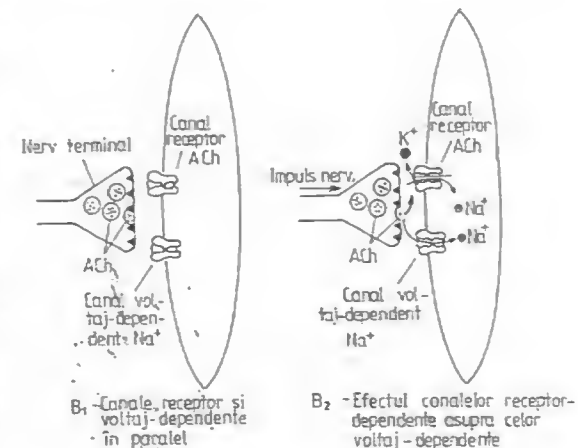
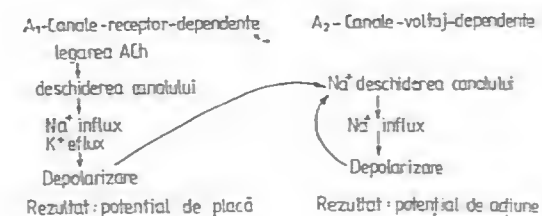


Fig. 3.15. Acțiunea acetilcolinei asupra canalelor ionice receptor- și voltaj-dependente.

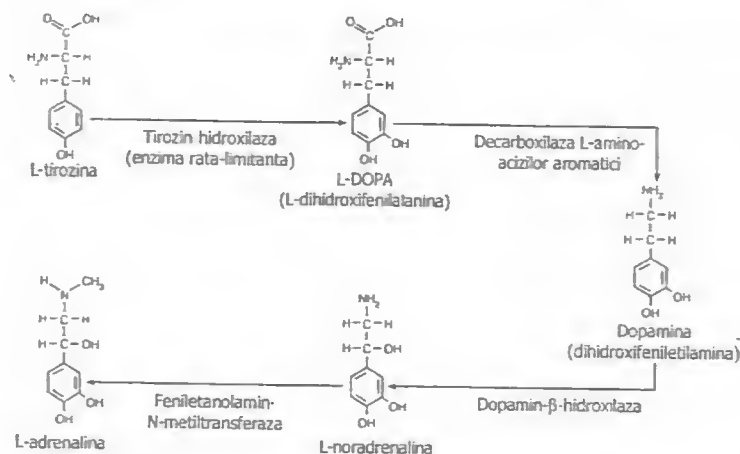


Fig. 3.16. Etapele biosintezei catecolaminelor.

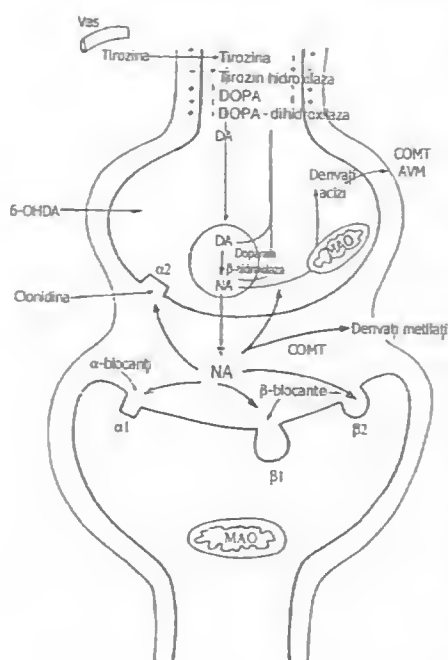


Fig. 3.17. Biosinteza, eliberarea și efectele noradrenalinei la nivelul sinapsei adrenergice.

Biosinteza acestora se realizează la nivel neuronal din tirozină sau prin hidroxilarea prealabilă a fenilalaninei cu ajutorul fenilalanil hidroxi-lazei, al cărei deficit genetic determină oligofrenia fenilpiruvică. Din hidroxilarea tirozinei rezultă dihidroxifenilalanina (DOPA), iar prin decarboxilarea acestora se formează dopamina, ca mediator chimic și, totodată, precursor al noradrenalinei, principalul neurotransmițător simpatico-adrenergic. Sub influența unei enzime metilante din glanda medulosuprarenală, noradrenalina este transformată în adrenalină.

După ce au fost sintetizate la nivelul corpului neuronal, catecolaminele sunt depozitate în vezicule cromafine și transportate axonal spre butonii sinaptici sau varicozitățile neuronilor adrenergici, în cazul dopaminei și noradrenalinei, sau stocate în granulele celulelor secretoare medulosuprarenale în cazul adrenalinei.

În afara de catecolamine, veziculele cromafine conțin neuropeptidul Y, ATP, ioni de calciu și o proteină acidă denumită cromogranină.

În afara catecolaminelor sintetizate *de novo*, veziculele butonilor sinaptici și varicozitățile terminale captează și stochează o parte din noradrenalina eliberată în lichidul extracelular al fantei sinaptice (fig. 3.17).

Eliberarea catecolaminelor. Se realizează printr-un mecanism fizico-chimic similar celui descris la terminațiile nervoase colinergice. Atât dopamina și noradrenalina ca mediatori chimici simpatici, cât și adrenalina ca hormon medulosuprarenal circulant sunt eliberate de la nivelul veziculelor și granulelor cromafine prin exocitoză. Depolarizarea membranelor și prezența ionilor de calciu sunt factori indispensabili eliberării. O proteină citoplasmatică denumită anexină, cu sensibilitate deosebită pentru ioni de calciu, intervine la nivelul porilor de fuziune a veziculelor cu membrana presinaptică, permițând descărcarea conținutului vezicular în fanta sinaptică. În teritoriul glandular medulosuprarenal eliberarea catecolaminelor respective se realizează cu ajutorul acetilcolinei din fibrele preganglionare ale nervului splanhnic, ca rezultat al acțiunii stimulante a acesteia asupra receptorilor nicotiniici de la suprafața celulelor cromafine. După eliberare, catecolaminele sunt recunoscute de moleculele receptoare specifice de la suprafața membranei postsinaptice neuronale sau a celulelor efectoare.

Receptorii adrenergici. Au fost inițial clasificați în alfa (α) și beta (β) adrenergici. O analiză fizico-farmacologică mai detaliată a dus la identificarea a două subtipuri de receptori α (α_1 și α_2) și β (β_1 și β_2) adrenergici. Clonarea și precizarea expresiei genice a receptorilor adrenergici a stabilit ulterior existența a trei tipuri de adrenoreceptori cu câte trei subtipuri. În prezent se admite că familia receptorilor adrenergici metabotropi este constituită din următoarele nouă subtipuri:

- receptori α_1 , cu subtipurile α_{1A} , α_{1B} și α_{1C} ;
- receptori α_2 , cu subtipurile α_{2A} , α_{2B} și α_{2C} ;
- receptori β , cu subtipurile β_1 , β_2 și β_3 .

Structura glicoproteică a celor nouă subtipuri de receptori adrenergici este comună, fiind reprezentată de un singur lanț polipeptidic format din 400-500 de aminoacizi cu lungime și secvență variabilă. Afinitatea receptorilor adrenergici față de liganzii agonști și antagoniști este diferită, fiind mai mare pentru noradrenalină decât pentru adrenalină în unele țesuturi și organe.

Localizarea lor, de asemenea, diferă la nivelul sinapselor interneuronale și neuro-efectoare. Receptorii α_1 - și β_1 -adrenergici sunt localizați postsinaptic în unele din organele efectoare periferice prevăzute cu funcții vegetative (cord, vase, rinichi, splină, tub. digestiv, vezică, uter, piele etc.). În timp ce receptorii α_2 -adrenergici se găsesc atât presinaptic, cât și postjuncțional. La nivelul cerebro-spinal, numeroase grupe neuronale conțin atât echipamentul enzimatic necesar sintezei de catecolamine, cât și receptori specifici indispensabili producerii efectelor biologice ale acestora.

Acțiuni fiziologice. Acțiunile determinate de activarea diverselor tipuri de receptori adrenergici sunt rezultatul efectelor mediate de proteinele G asupra generării de mesageri secunzi și influențării

canalelor ionice generatoare de manifestări electrice postsinaptice ce diferă în funcție de tipul de receptori afectați. Spre deosebire de subtipul α_1 , care acționând asupra proteinei Gs, activează fosfolipaza C formatoare de IP_3 și DAG, tipul α_2 inhibă, prin intermediul proteinei Gi, cuplul adenilat ciclază-AMP ciclic. Subtipurile β_1 , β_2 și β_3 , din contră, cresc conținutul în AMP ciclic al teritoriului postsinaptic ca urmare a activării adenilat ciclazei. În funcție de variațiile mesagerilor secunzi determinate de activarea sau inhibarea diverselor subtipuri de receptori adrenergici, noradrenalina și adrenalina produc efecte membranare postsinaptice de scurtă durată și nucleare de lungă durată (fig. 3.18).

Stimularea receptorilor α_1 -adrenergici, activând turnover-ul fosfoinozitolului și

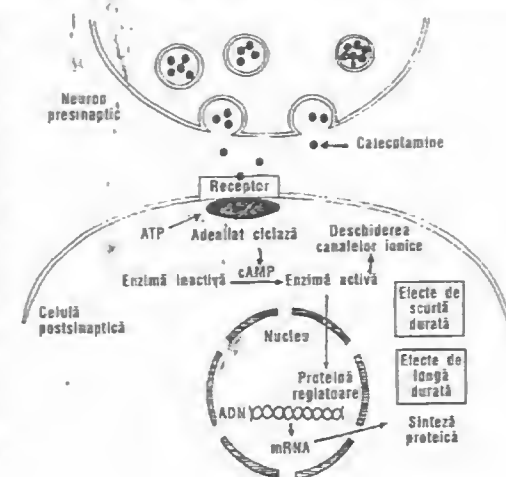


Fig. 3.18. Efecte de scurtă și lungă durată a catecolaminelor.

formarea de IP_3 și DAG, determină creșterea calciului și însoțirilor mediate de protein kinaza C. La rândul lor, receptori α_2 -adrenergici, reducând activitatea adenilat ciclazei și conținutul în AMP ciclic al teritoriului postsinaptic, inhibă canalele de calciu voltaj-dependente și cresc conductanța pentru ioni de potasiu, determinând hiperpolarizarea membranei postsinaptice. Prin acest mecanism, stimularea receptorilor α_2 -adrenergici realizează inhibiția presinaptică a eliberării de noradrenalină.

La rândul său, stimularea receptorilor β -adrenergici realizează activarea indirectă a adenilat ciclazei prin intermediul proteinei Gs, însoțită de acumularea cAMP și protein kinazei cAMP-dependente, implicată în numeroase procese și reacții celulare.

La nivel central, efectele noradrenalinei sunt de tip activator, în cazul stimulării receptorilor postsinaptici α -adrenergici, sau de tip inhibitor, în cazul activării receptorilor β -adrenergici.

Inactivarea noradrenalinei și adrenalinei. Este realizată în fanta sinaptică de către monoaminoxidază (MAO) și de catecol-O-metiltransferază (COMT). Ambele catecolamine sunt supuse într-un prim moment nitrilmetilării cu ajutorul COMT, pentru ca, apoi, să fie degradate de către MAO în 3-metoxi-4-hidroxifenilglicol și acid vanilmandelic (AVM). În afara inactivării enzimice, îndepărtarea noradrenalinei și adrenalinei din fanta sinaptică este realizată prin procesul fizico-chimic de captare și precaptare presinaptică.

Dopamina. În afara rolului de precursor al noradrenalinei, dopamina îndeplinește și funcția de mediator chimic propriu unor căi neuronale atât periferice, cât și centrale. La nivel periferic, cantități dizababile se găsesc în ganglionii vegetativi simpatici, plămân, intestin, vase, cîrpusculii carotidieni, retină etc.

La nivel central, dopamina reprezintă mai mult de 50% din cantitatea totală de catecolamine cerebrale. Peste 80% din această cantitate se găsește în nucleii bazali și mezencefal. Proiecțiile ascendente mezencefalice prezintă două componente aparținând sistemului nigro-striat și sistemului mezencefalo-cortico-limbic. În timp ce sistemul nigro-striat proiectează în nucleul caudat, putamen, globus pallidus, nucleul accumbens, sistemul mezencefalo-cortico-limbic trimite proiecții în cortexul anterior prefrontal, piriform, entorhinal etc.

O altă localizare centrală a sistemului dopaminergic este reprezentată de celulele și receptori specifici de la nivelul eminenței mediane a hipotalamusului, influențând în sens inhibitor secreția hormonală hipofizară. Stocarea veziculară și eliberarea exocitară a dopaminei sunt similare celorlalte două catecolamine. Inactivarea însă se realizează pe o altă cale, cu participarea monoaminoxidazei de tip α în cazul dopaminei intracelulare, dând naștere acidului 3,4-dihidroxifenilacetic și al COMT formatoare de acid homovanilic (HVA), în cazul stocului extracelular.

Efectele fizio-farmacologice se produc atât la nivel central, cât și periferic, prin cuplare cu receptori dopaminergici din țesuturile respective. În funcție de afinitatea față de liganzii specifici, receptori dopaminergici sunt împărțiți în cinci subtipuri: D_1 , D_2 , D_3 , D_4 și D_5 . Majoritatea acestora acționează în sens inhibitor. În timp ce receptori: D_2 , D_3 și D_4 sunt inhibitori ai sistemului adenilat ciclază-cAMP, determinând hiperpolarizare membranală, receptori D_1 și D_5 , fiind cuplați cu proteina Gs la adenilat ciclază, determină creșterea AMP ciclic, ca mesager secund. Datorită afinității diferite a receptorilor dopaminergici față de drogurile agoniste și antagoniste (haloperidol, fenotiazine, benzodiazepine) s-a extins utilizarea acestora de la tratamentul tulburărilor de motilitate (tremur parkinsonian și coreiform) la dezechilibrele psiho-afective și endocrine (bromocriptina ca substanță inhibitorie a secreției de prolactină).

Serotonina sau 5-hidroxitriptamina (5-HT). Este amina biogenă rezultată din hidroxilarea urmată de decarboxilare a triptofanului, prevăzută cu proprietăți biologice atât de mediator chimic, cât și de hormon local. Aproximativ 90% din serotonina aflată în organism se găsește la nivelul tubului digestiv, 8% în trombocite și doar 2% în sistemul nervos central. Țesuturile cele mai bogate în serotonină sunt celulele enterocromafine ale tubului digestiv și glanda pineală. Rolul de mediator chimic al serotoninei este mai evident la nivelul nucleilor reticulari ai rafeului din trunchiul cerebral. De la nivelul acestora pleacă o serie de căi ascendente spre talamus, hipotalamus, aria postrema, substanța cenușie periventriculară, scoartă și cerebel, precum și descendente spre substanța cenușie din măduva spinării.

În afara țesutului nervos și a celulelor enterocromafine intestinale, serotonina se găsește în plachetele sanguine ca principală cale de captare și transport al fracției circulante.

Biosinteza serotoninei. Are la bază fenomenul în cascadă de transformare a triptofanului în 5-hidroxitriptofan în prezența triptofan hidroxilazei, urmat de decarboxilarea acestuia cu ajutorul a 5-hidroxitriptofan

decarboxilazei formatoare de 5-hidroxitriptamină (serotonină) (fig. 3.19). Prin acetilare cu ajutorul N-acetiltransferazei, serotonină se transformă în melatonină, principalul hormon pineal.

Stocarea serotoninei are loc sub formă de vezicule granulare repartizate într-un compartiment ușor eliberabil și altul de rezervă, rezultat din excesul de sinteză.

Acțiunile sinaptice ale serotoninei sunt predominant inhibitorii, realizate prin hiperpolarizare membranală indusă de creșterea conductanței la potasiu. În cazul acțiunii facilitatoare, aceasta este consecința depolarizării produse de scăderea conductanței potasice. Astfel, factorul comun al efectelor sinaptice ale serotoninei pare a fi alterarea permeabilității membranare postsinaptice față de neuronii de potasiu. Mecanismul de producere a proprietăților sinaptice ale serotoninei are la bază participarea a trei tipuri de receptori ($5-HT_1$, $5-HT_2$ și $5-HT_3$) cu patru subtipuri în cazul receptorilor $5-HT_1$ și câte trei subtipuri în cazul receptorilor $5-HT_2$ și $5-HT_3$. Identificarea acestora s-a realizat în funcție de răspunsul diferențiat la diverșii agonști și antagonști ai acțiunilor serotoninei. În timp ce toate subtipurile receptorilor $5-HT_1$ și $5-HT_2$ se găsesc în creier, cele trei subtipuri de receptori $5-HT_3$ sunt localizate numai în sinapsele vegetative periferice. Receptorii $5-HT_1$, având localizare presinaptică, determină prin intermediul proteinei Gi fenomene de hiperpolarizare membranală potasică și inhibiția eliberării de serotonină.

Receptorii $5-HT_2$ sunt localizați postsinaptic, determinând depolarizare membranală și stimulare postsinaptică atât în cazul celulelor nervoase, cât și al celor efectoare. Cortexul cerebral prezintă o mare densitate de receptori $5-HT_2$, a căror activare contribuie la producerea reacțiilor de trezire sau de somn în cazul inhibării cu antagonști specifici.

Inactivarea serotoninei se realizează în două trepte: cu ajutorul monoaminoxidazei (MAO) de tip A în 5-hidroxi-indolacetaldehidă, care sub influența aldehid dehidrogenazei se transformă în acidul 5-hidroxi-indolacetic (5-HIAA). Dozarea 5-HIAA, ca produs final al inactivării, oferă indicații asupra capacității de sinteză, eliberare și inactivare a serotoninei.

Histamina. Ca și serotonina, este un hormon tisular care posedă și proprietăți de mediator chimic la nivelul terminațiilor nervoase histaminergice. Ea a dobândit statut de mediator chimic după ce i s-a descoperit prezența în diferite formațiuni nervoase centrale și periferice întregite de proprietăți neurotransmițătoare.

Majoritatea neuronilor histaminergici centrali se găsesc în hipotalamusul posterior, cu proiecții ale fibrelor axonale atât în sens ascendent la nucleii talamici, amigdală, hipocampus și cortexul cerebral, cât și în sens descendent la corpii mamilari, formația reticulară mezencefalică, nucleul tractusului solitar și măduva spinării. Existența căilor reticulo-corticale histaminergice explică o parte din efectele unor substanțe antihistaminice, care influențează starea de veghe și somn, comportamentul psiho-afectiv etc.

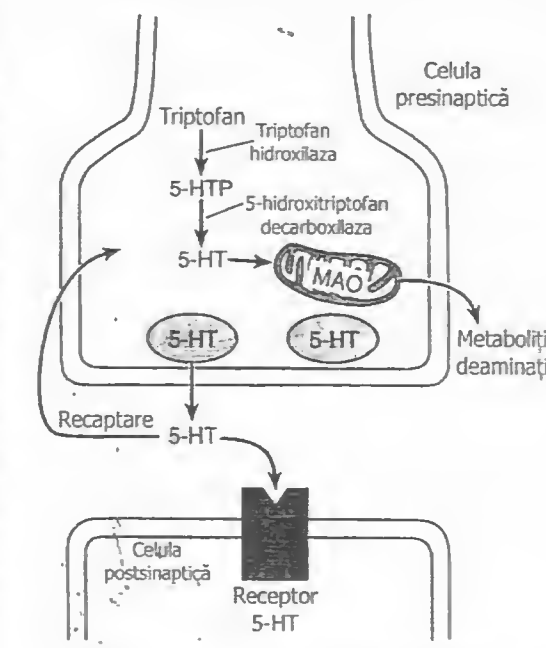


Fig. 3.19. Biosinteza, eliberarea și inactivarea serotoninei.

Biosinteza histaminei se realizează pe cale enzimatică într-o singură treaptă prin decarboxilarea histidinei de către histidin decarboxilază. Ea are loc nu numai în neuronii histaminergici, ci și la nivelul mastocitelor, plachetelor și leucocitelor bazofile. Reglarea biosintezei de histamină este dependentă de aportul de histidină și vitamina B₆ (piridoxal fosfat). Aproximativ 50% din histamina țesutului nervos are localizare presinaptică veziculară. Eliberarea are loc în timpul depolarizării sinaptosomale cu participarea ionilor de calciu.

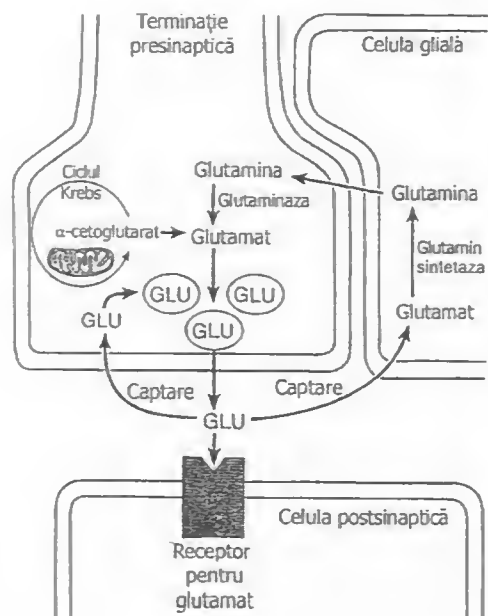
Acțiunile postsinaptice ale histaminei se realizează prin intermediul receptorilor H₁ și H₂, cu participarea unui al treilea subtip, cu rol de autoreceptor presinaptic reprezentat de receptorul H₃. Acesta diminuează eliberarea histaminei de la nivelul fibrelor histaminergice centrale și periferice, participând la controlul propriei sale eliberări.

Spre deosebire de receptorii H₁, care produc efecte neurostimulante centrale, permeabilizante capilare și vasodilatatoare periferice, receptorii H₂ determină hiperpolarizare membranară și inhibiție postsinaptică. Ca și receptorii H₁, realizează la nivelul vaselor creșterea permeabilității vasculare și vasodilatație capilară însoțită de stimularea secreției gastrice.

Inactivarea histaminei se produce în două etape reprezentate de metilare, urmată de dezamioare oxidativă formatoare de acid metilimidazolacetic sau de către histaminază prin hidroliză discretă în acid imidazolacetic urinar.

Durata de viață a histaminei este scurtă și puternic influențată de stres, febră, anestezie, reacții alergice etc.

Prin mecanisme neurochimice centrale complexe, histamina participă la inducerea vegheii și somnului, precum și la eliberarea unor hormoni hipofizari (ACTH, vasopresină, prolactină), reglarea ingestiei de alimente și termoreglării. La nivel ganglionar, facilitează transmiterea interneuronală simpatică, iar la nivelul terminațiilor senzitive periferice provoacă efecte hiperalgeziante, comportându-se ca un mediator chimic al durerii.



3. Aminoacizi neurotransmițători. În afara funcțiilor metabolice clasice, unii aminoacizi îndeplinesc rol de mediatori chimici excitatori sau inhibitori la nivel cerebro-spinal. Din prima categorie, a aminoacizilor excitatori, fac parte acizii glutamic și aspartic, iar din cea de-a doua – aminoacizii inhibitori, acidul gamma-aminobutiric și glicina. Taurina îndeplinește rol mai mult de neuromodulator sinaptic, decât de mediator chimic.

Aminoacizii excitatori. Acizii glutamic și aspartic. Suot acizi aminați monoaminodicarboxilici neesențiali sintetizați din glucoză sau unii produși intermediari ai ciclului Krebs. Sinteza lor se realizează la nivel neuronal presinaptic, devenind activi numai sub forma anionică de L-glutamat și, respectiv, de L-aspartat.

Biosinteza anionului glutamat se realizează la nivelul matricei mitocondriale fie prin transmiterea acidului α -cetoglutaric, fie prin dezaminarea glutaminei (fig. 3.20).

În cazul anionului aspartat, acesta rezultă, ca și în cazul glutamatului, la nivel mitocondrial din transaminarea oxalacetatului din ciclul Krebs

Fig. 3.20. Biosinteza, eliberarea și efectele sinaptice ale glutamatului.

io aspartat și alfa-cetoglutarat. Deși conținutul țesutului nervos cerebral al mamiferelor este de aproximativ 10 ori mai mare în cazul glutamatului decât al aspartatului, concentrația neuronală a acestora depășește de peste 1000 de ori pe cea a neurotransmițătorilor clasici. Acumularea și stocarea predominantă a glutamatului în veziculele mici sinaptice se realizează prin cotransport cuplat cu ioni de sodiu. Majoritatea neuronilor glutamatergici se găsesc la nivelul cortexului cerebral și în hipocampus. Celulele piramidale neocorticale glutamatergice prezintă proiecții cortico-striate, cortico-talamice, cortico-pontine și cortico-fugale descendente, până la nivelul regiunilor cervico-dorsale și lombare ale măduvei spinării. Tractusurile olfactive, gustative, auditive și somestezice conțin, de asemenea, numeroși neuroni aminoacidergici excitatori.

Eliberarea lor se realizează, ca și în cazul altor neurotransmițători, prin exocitoză cu participarea ionilor de calciu sub influența fenomenelor electro-chimice de depolarizare a terminațiilor presinaptice. Acțiunile postsinaptice ale aminoacizilor excitatori mediază răspunsurile depolarizante ale majorității neuronilor din sistemul nervos central al mamiferelor prin intermediul a trei tipuri de receptori ionotropi specifici. Ca și receptorii nicotinci, receptorii pentru glutamat și aspartat sunt receptori cuplați cu canalele ionice permeabile selective la cationi, inclusiv la calciu. Din această categorie fac parte receptori NMDA, KA și AMPA. Receptorii NMDA cu afinitate deosebită pentru N-metil-D-aspartat și glutamat realizează activarea canalului voltaj-dependent pentru cationii Na⁺ și K⁺ însoțită de intrarea concomitentă a calciului. Permeabilitatea mare la calciu este blocată de magneziu. Stimularea repetitivă a receptorilor NMDA îndepărtează efectul blocant al magneziului, determinând fenomenul de potențare postsinaptică de lungă durată implicat în realizarea proceselor neurochimice de memorare și învățare.

Receptorul kainat este activat de acidul kainic, analog structural și funcțional al glutamatului. El predomină în cerebel și determină efecte membranare depolarizante și descărcări epileptiforme postsinaptice.

Receptorul AMPA este activat în seos depolarizant atât de acidul amino-3-hidroxi-5-metil-4-izoxazolpropionic, cât și de glutamat, determinând răspunsuri postsinaptice excitaute de scurtă durată. O a patra categorie de receptori pentru glutamat cuplați cu proteina membranară G și denumiți receptori metabotropi au fost identificați recent cu rol modulator al neurotransmisiei glutamatergice propriu-zise. Ca și receptorii KA, receptorii metabotropi sunt situați și presinaptic, cu rol activator asupra eliberării mediatorului și potențării sinaptice de lungă durată.

Hipoxia, hipoglicemia, ischemia, convulsiile prelungite și traumele mecanice determină creșterea glutamatului extraneuronal însoțită de intensificarea influxului de Na⁺ și Ca²⁺, depolarizare prelungită și dereglări metabolice neuroale multiple și generatoare de fenomene neurotoxice ireversibile.

Aminoacizii inhibitori. Reprezentați de acidul gamma-aminobutiric și glicină (glicocol), aminoacizii inhibitori se găsesc în concentrații mari în sistemul nervos cerebro-spinal al mamiferelor.

Acidul gamma-aminobutiric (GABA) rezultă din decarboxilarea acidului glutamic în prezența enzimei glutamic decarboxilaza (fig. 3.21).

Decarboxilarea acidului glutamic are loc la nivel neuronal atât în creier și măduva spinării, cât și în unii neuroni ai sistemului nervos periferic folosind piridoxal-fosfatul drept coenzimă.

La nivel central predomină localizările cortico-subcorticeale, hipocampice, talamice și ale nucleilor bazali. La nivelul neocortexului, neuronii gaba-ergici participă la circuitele inhibitorii locale ale scarței somato-senzitive și vizuale. Contacte sinaptice inhibitorii realizează oeuronii gaba-ergici corticali cu celule piramidale și extrapiramidale descendente alături de dopamină.

În talamus, hipotalamus, mezencefal și punte, GABA constituie unul din neurotransmițătorii inhibitori ai complexului polineuronal din formațiunea reticulată ponto-mezencefalo-diencefalică.

Cerebelul, măduva spinării și retina conțin, de asemenea, cantități suficiente de GABA ca neurotransmițător inhibitor. Acțiunile inhibitorii, hiperpolarizante mediate de GABA, au la bază creșterea concentrației membranare pentru ioni de clor ca urmare a interacțiunii cu unul din receptori specifici.

Receptorii pentru GABA sunt de două feluri: GABA-A și GABA-B. Spre deosebire de receptori GABA-A, care suot receptori ionotropi cuplați cu un canal ionic specific pentru clor, receptori GABA-B sunt receptori metabotropi cuplați cu AMP ciclic și prevăzuți cu efecte de lungă durată. Prin intermediul acestor două tipuri de receptori, fibrele oervoase gaba-ergice sunt la originea unei mari părți din inhibițiile realizate în sistemul nervos cerebro-spinal, cu răsunet funcțional asupra motricității, senzațiilor, comportamentelor și funcțiilor cognitive. În clinică sunt preferate substanțele care intensifică activitatea neuronală gaba-ergică: barbituricele ca antiepileptice și hipnotice, benzodiazepinele ca anxiolitice și hipno-sedative.

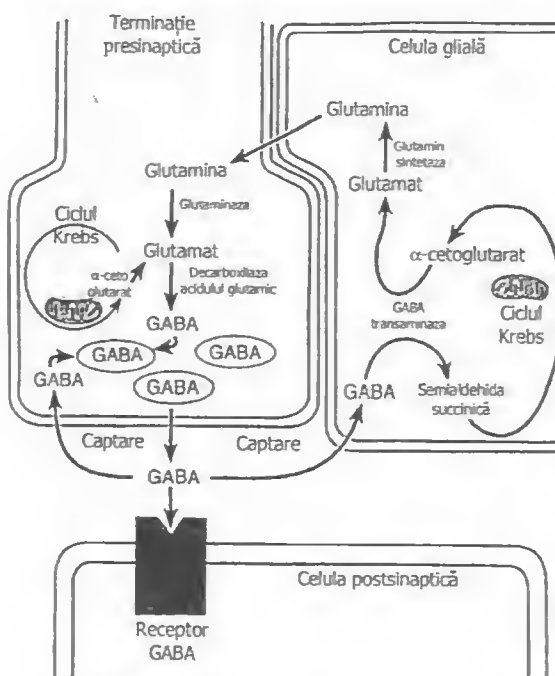


Fig. 3.21. Biosinteza, eliberarea și acțiunea postsinaptică a acidului gamma-aminobutiric.

sunt mai mari în perioada de creștere decât în cursul maturității. Pe această bază s-a făcut afirmația că taurina stimulează creșterea și dezvoltarea nervoasă.

Stimularea electrică sau chimică (potasică) neuronală determină eliberare de taurină însoțită de hiperpolarizarea membranei postsinaptice și reacții inhibitorii produse de activarea canalelor de clor cuplate cu receptorul membranal corespunzător. Specificitatea acestuia este relativă, întrucât prezintă activitate și pentru antagoniștii receptorilor glicinerici (stricnină) și gaba-ergici (bicuculină). Pe această bază, se atribuie taurinei rol mai mult de modulator al transmiterii chimice inhibitorii realizate de ceilalți doi aminoacizi inhibitorii, decât de neurotransmițător propriu-zis.

4. Neuropeptidele. Din categoria peptidelor neuroactive implicate în transmiterea sinaptică fac parte neuropeptidele opioide și neopioide, precum și unele peptide hormonale circulante și locale. O parte dintre acestea îndeplinesc funcții atât de hormoni circulanți sau locali într-un anumit teritoriu și de mediatori chimici sau simpli modulatori sinaptici în altele. O altă particularitate a mediației chimice peptidergice este reprezentată de posibilitatea coexistenței neuropeptidului cu unul din neurotransmițătorii clasici la nivelul aceleiași terminații sinaptice (ex: acetilcolină cu VIP sau catecolamine cu NPY).

Peptidele opioide. Denumite și endomorfine, sunt reprezentate de enkefalinele: met-enkefalina și leu-enkefalina, endorfinele α , β și γ , precum și de către dinorfinele A și B. Biosinteza lor are loc dintr-un precursor comun pro-opiomelanocortina formată din 263 aminoacizi (vezi fig. 13.7 - capitolul Fiziologia glandelor endocrine).

Enkefalinele. Sunt pentapeptide sintetizate de neuronii larg distribuiți în sistemul nervos cerebro-spinal de la scoarța cerebrală până la substanța gelatinoasă din coarnele posterioare ale măduvei spinării.

Glicina (glicocalul). Este, de asemenea, aminoacid neesențial sintetizat la nivel neuronal din glucoză pe calea 3-fosfogliceratului și a fosfoserinei. Fiind unul din aminoacizii cei mai mici, glicina din proteinele consumate traversează bariera hemato-encefalică pentru a fi preluată și folosită ca mediator chimic inhibitor. Distribuția cerebro-spinală a glicinei este mai limitată decât a GABA, concentrațiile cele mai mari găsindu-se în trunchiul cerebral, cerebel și coarnele anterioare ale măduvei spinării. Eliberarea din butonul presinaptic este Na^+ -dependentă, iar acțiunea hiperpolarizantă postsinaptică este clor-dependență, prin intermediul unui receptor ionotrop. Proprietățile inhibitorii postsinaptice ale glicinei sunt blocate de către stricnină. Convulsiile produse de stricnină se datorează blocării mediației chimice glicinerice.

Un alt aminoacid prevăzut cu proprietăți inhibitorii asupra excitabilității neuronale este taurina.

Taurina. Se găsește în cantități mari în veziculele sinaptice ale scoarței cerebrale, cerebelului și hipocampusului. Cantități suficiente au fost găsite în trunchiul cerebral, măduva spinării și retină. Concentrațiile acestora

Ele predomină în neuronii monoaminergici, contribuind la modularea în sens inhibitor a sensibilității nociceptive. Extranervaxial, enkefalinele au fost detectate la nivelul ganglionilor simpatici, tubului digestiv, glandei medulosuprenale și retinei.

Endorfinele. Derivă dintr-un fragment al precursorului comun denumit beta-lipotropină. Acesta este scindat enzimatic în beta-endorfinele beta (cu 31 aminoacizi), gamma (27 aminoacizi), alfa (16 aminoacizi) și delta (17 aminoacizi). Spre deosebire de enkefaline, endorfinele prezintă o localizare mai limitată. Ele predomină în hipotalamusul medio-bazal și lobul anterior al hipofizei cu rol inhibitor asupra reacțiilor neuro-endocrine produse de stres.

Dinorfinele A (17 aminoacizi) și B (13 aminoacizi). Reprezintă cea de-a treia categorie de peptide opioide endogene rezultate din clivarea enzimatică a prodinorfinei. Ele au distribuție centrală difuză, similară cu a enkefalinelor, excepție făcând doar prezența în cantități mai mari la nivelul complexului hipotalamo-retrohipofizar.

Acțiunile inhibitorii sinaptice ale peptidelor opioide au la bază participarea a cel puțin cinci tipuri de receptori membranari specifici.

– Receptorii μ sunt receptori ionotropi ce prezintă afinitate pentru endorfină, beta-endorfină și enkefaline. Ei sunt de două feluri: μ_1 și μ_2 , având ca antagoniști nalaxonul și maltrexonul.

– Receptorii δ interacționează ca modulatori ionotropi cu cei ai enkefalinelor, prevăzuți cu proprietăți inhibitorii asupra canalelor de Ca^{2+} și a celor de K^+ .

– Receptorii κ au afinitate deosebită pentru dinorfine, acțiunea lor exercitându-se prin intermediul proteinei G și adenilat ciclazei, cu răsunetul corespunzător inhibitor asupra canalelor de Ca^{2+} . Activarea lor provoacă analgezie, sedare, somn și catalepsie.

– Receptorii σ nu prezintă sensibilitate specifică, având oarecare afinitate doar pentru enkefaline.

– Receptorii ϵ , considerați ca subtip al receptorilor μ , prezintă afinitate pentru beta-endorfine.

Efectele predominant inhibitorii ale peptidelor opioide se produc prin modularea eliberării presinaptice a neurotransmițătorilor colinergici, adrenergici și serotoninergici însoțită de inhibarea canalelor de Ca^{2+} și activarea celor de K^+ . Acționând în sens inhibitor atât presinaptic, cât și postsinaptic, peptidele opioide participă la realizarea analgeziei și inhibarea reacțiilor neuro-endocrine-metabolice produse de stres. Ca factori antistres, beta-endorfinele acționează în mod predominant la nivel hipotalamo-hipofizar, în timp ce enkefalinele sunt active la nivelul căilor simpatico-adrenergice cerebro-spinale și periferice (medulosuprenali).

Inactivarea peptidelor opioide se realizează enzimatic, cu ajutorul endopeptidazelor de tipul enkefalinazei, aminopeptidazei A și a peptidil-dipeptidazei A.

Peptidele neopioide. Sunt reprezentate de o gamă variată de neuropeptide care îndeplinesc roluri diferite fie de neurotransmițător sinaptici sau cotransmițători, fie de neuromodulatori sau hormoni locali. Una din primele peptide neopioide descoperite în celulele enterocromafine ale tubului digestiv este substanța P, considerată capul de serie al neurokininelor (tahikinine) bioactive.

Substanța P. Formată din 11 aminoacizi, este larg răspândită în sistemul nervos central și periferic. Cele mai mari concentrații se găsesc la nivelul căilor nervoase implicate în transmiterea și percepția senzațiilor dureroase. Stimularea electrică a acestora determină eliberare de substanță P. Pe această bază s-a atribuit substanței P rol de neurotransmițător al aferențelor senzitive nociceptive.

Eliberarea substanței P este calciu-dependență, fiind activată de capsacină (substanță toxică extrasă din ardeul iute) și blocată presinaptic de către peptidele opioide și GABA. Acțiunile substanței P sunt de tip excitator atât la nivelul membranelor postsinaptice, cât și asupra teritoriilor secretoare de hormoni circulanți sau locali. Ele se realizează prin intermediul a două tipuri de receptori membranari metabotropi: NK_{1A} și NK_{1B} . Având localizare presinaptică și realizând efecte depolarizante postsinaptice la nivelul căilor senzoriale nociceptive, substanța P îndeplinește rol atât de principal mediator chimic al durerii, cât și de neuromodulator al unor sinapse cerebro-spinale sau periferice.

Neutensina. Este un tridecapeptid prezent în concentrații mari la nivelul hipotalamusului anterior și glandelor anexe endocraniane. Neuronii neutensinergici au fost identificați în cortexul cerebral, amigdală, talamus, ganglionii bazali, trunchiul cerebral și substanța gelatinoasă din măduva spinării. Atât la nivel central, cât și în cazul tractului gastro-intestinal, neutensina exercită efecte modulatorii asupra neuronilor colinergici și adrenergici. Injectată intraventricular provoacă analgezie, hipotermie și eliberare de hormoni

hipofizari. Extranevral, neurotensina produce, ca și substanța P, vasodilație locală, hipotensiune și creștere a permeabilității vasculare.

Peptidul vasoactiv intestinal (VIP). Format din 28 de aminoacizi are distribuție centrală și periferică difuză. La nivel cerebro-spinal se găsește în hipotalamus, hipocamp, amigdală și neocortex. Atât la nivel central, cât și în întreg tubul digestiv, plămâni, aparatul genital și pancreas, VIP este eliberat împreună cu acetilcolina, îndeplinind rol de cotransmițător al acesteia. În afara proprietăților neuromodulatoare, VIP îndeplinește rol și de mediator chimic activator al eliberării de hormoni adenohipofizari (prolactină, somatotrop și luteinizant). În pereții intestinali, VIP este prezent în concentrații mai mari în fibrele nervoase ale plexurilor intraneurale decât în cele din mucoasă sau submucoasă. În afara rolurilor de neurotransmițător sau cotransmițător colinergic, VIP îndeplinește și funcții de hormon local prevăzut cu proprietăți metabolice importante (activarea sistemului adenilat ciclază-cAMP, stimularea insulino-secreției, lipolizei și conversiei glicogenului în glucoză etc.).

Colecistokina neuronală (CCK-8). Este segmentul peptidic terminal al colecistokinei hormonale, care conține ultimii 8 din cei 33 de aminoacizi ai acesteia. A fost identificată imunohistochimic în scoarța cerebrală, hipocampus, hipotalamus, nucleul amigdalian și în întreg sistemul limbic. Predominând în butonii terminali, eliberarea sa este stimulată de K^+ .

Efectele CCK-8 se realizează prin două tipuri de receptori. În timp ce receptorii A au localizare predominant periferică, receptorii B asigură efectele centrale ale CCK-8. Prin intermediul receptorilor B se realizează controlul amigdalian și hipotalamic al ingestiei de alimente. În favoarea participării CCK-8 la producerea senzației de foame și sațietate pledează faptul că la sfârșitul mesei crește concentrația sanguină a acesteia, determinând inhibarea ingestiei de alimente. Prin mecanisme neurotransmițătoare centrale sau neuromodulatoare, CCK-8 întețește proprietățile hormonale pancreatice și biliare ale colecistokinin-pancreoziminei.

Neuropeptidul Y (NPY). Se găsește atât în creier, cât și la nivelul terminațiilor simpatice periferice, având localizare comună cu noradrenalina. Cele mai mari concentrații centrale au fost detectate în scoarța cerebrală, ganglionii bazali, amigdale, hipocampus și complexul hipotalamo-hipofizar. Stimularea acestora determină eliberare simultană atât de noradrenalină, cât și de NPY. Având rol de cotransmițător al mediației chimice adrenergice, NPY potențează și prelungește în timp efectele energogene ale acesteia. Prin acest mecanism se realizează stimularea ingestiei de alimente și descărcări hormonale de ACTH, TSH și hormoni de creștere. Acțiunile neuromodulatoare ale NPY se produc cu participarea a trei tipuri de receptori specifici: Y_1 , Y_2 , Y_3 , cuplați negativ cu sistemul adenilat ciclază-cAMP. Stimulând ingestia de alimente și verigile hormonale energotrope, NPY este considerat reglator central al metabolismului energetic.

Somatostatina (SST). Este un peptid format din 14 aminoacizi, prevăzut cu proprietăți inhibitorii atât ale secreției hipofizare de hormon somatotrop, cât și a numeroase structuri neuronale centrale și periferice. Acesta coexistă cu catecolaminele, GABA sau cu peptidele opioide în veziculele sinaptice ale unor structuri nervoase cerebro-spinale, de unde se eliberează, cu participarea ionilor de calciu, pentru a inhiba descărcările neuronale prin hiperpolarizare potasică. Participarea celorlalte peptide hormonale (tireoliberina, gonadoliberina, corticoliberina etc.) la modularea neurotransmisiei sinaptice va fi menționată la capitolul Hormoni locali. Alte peptide neuroactive (vasopresina, oxitocina, ACTH, angiotensina, bradikina, peptidul înrudit cu gena calcitoninei, galanina) vor fi prezentate la capitolele respective.

5. Mediația purinergică. Are la bază participarea ATP și adenozeinei la modificările de excitabilitate neuronală centrale și periferice. Sintetizat la nivel celular prin glicoliză sau fosforilare oxidativă mitocondrială, ATP este depozitat singur sau împreună cu acetilcolina în veziculele sinaptice colinergice, ori cu noradrenalina sau adrenalina în terminațiile sinaptice și granulele cromafine medulosuprenale. Eliberarea are loc concomitent cu a mediatorului respectiv sau este unică, în cazul stimulării fibrelor purinergice. Odată eliberat, ATP acționează ca mediator chimic sau cotransmițător.

tip P_2 în sens stimulator, determinând potențarea fenomenelor electro-chimice generatoare de potențiale de acțiune și de răspuns celular postsinaptic. Eliberarea de NO se soldează cu efecte atât excitante la nivel cerebro-spinal și cu acțiuni vasculare periferice relaxante de tip endotelio-dependente. Spre deosebire de ATP, adenozeina face oficiul de modulator inhibitor al activității neuronale centrale și periferice prin intermediul atât al receptorilor P_1 , cât și al inhibării canalelor voltaj-dependente de Ca^{2+} . Efectele hiperpolarizante simple, hipnosedative și antinociceptive ale adenozeinei sunt antagonizate de cafeină și teofilină. Efecte sinaptice diferite exercită adenozeina și ATP nu numai la nivel cerebro-spinal, ci și în unele țesuturi și organe periferice, îndeplinind rol de mediatori chimici ai inervației vegetative non-adrenergice și non-colinergice.

6. Mediația chimică gazoasă. Progresele tehnice din ultimele decenii au precizat că nu numai radicalii liberi ai oxigenului, ci și speciile radicalare ale azotului și carbonului determină modificări importante ale excitabilității neuronale centrale și periferice.

Monoxidul de azot (NO). Identificat inițial cu factorul endotelial de relaxare (EDRF), este sintetizat la nivel neuronal din L-arginină în prezența enzimei nitroxid sintetaza calciu-calmodulin-dependentă și a NADPH. Cascada enzimatică formatoare se însoțește de eliberarea concomitentă de citrulină și activarea guanilat ciclazei formatoare de ciclic GMP (fig. 3.22).

Cuplul NO-cGMP îndeplinește rol atât de sistem de transducție a semnalelor inter- și intracelulare, realizând funcții atât de substanță neurotransmițătoare, cât și de hormon local paracrin și autocrin. Fiind produs neuronal gazoș cu moleculă mică ușor difuzibilă prin membranele celulare, NO asigură transmiterea chimică a mesajelor atât în sens anterograd postsinaptic, cât și retrograd presinaptic, cu participarea cGMP ca mesager secund.

Dintre celelalte substanțe bioactive, de o atenție crescândă se bucură o serie de derivați ai hormonilor steroizi și ai acidului arahidonic, de tipul prostaglandinelor, implicate în modificarea sensibilității nociceptive și a excitabilității nervoase centrale.

Pe această dublă cale, NO în doze mici fiziologice, influențează plasticitatea neuronală, favorizând potențarea postsinaptică de lungă durată a potențialelor de acțiune implicate în procesele de memorare și învățare, iar în doze mari exercită efecte neurotoxice prin peroxinitritul rezultat din cuplarea NO cu radicalul superoxid al oxigenului. La nivel neuronal periferic se admite că NO îndeplinește rol de mediator chimic relaxant al fibrelor non-colinergice și non-adrenergice vegetative.

Oxidul de carbon (CO). Rezultat din degradarea hemului hemoglobinei sub influența hemoxigenazei, participă împreună cu NO la neurotransmisia sau modularea neuro-vasculară centrală și periferică. Ca moleculă gazoasă semnal, CO provoacă atât reacții miorelaxante și vasodilatatoare locale, cât și activarea mediației chimice anterograde și retrograde centrale prin intermediul sistemului guanilat ciclazei-cGMP. Efectele stimulante de la nivelul structurilor neuro-vasculare

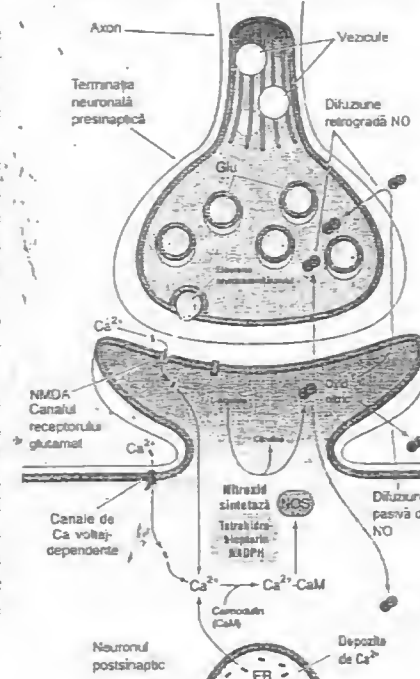


Fig. 3.22. Sinapsa nitrinergică – model funcțional.

centrale ale CO contribuie la reacțiile reflexe inhibitorii de tip depresiv, însoțite de reacții hipotalamo-hipofizare compensatoare (CRH, vasopresină, oxitocină etc.). Acționând atât la nivel neuro-vascular cerebral, cât și în unele teritorii neuro-efectoare periferice, interacționează cu NO, realizând reacții cumulative directe sau indirecte producătoare, în funcție de doză, nu numai de fenomene adaptative normale, ci și de stres oxidativ generator de stări patologice.

Împreună cu NO și alte gaze endogene (H_2S de exemplu), CO constituie o nouă clasă de substanțe chimice mediatore denumită gazotransmițători. Ca purtători de mesaje biologice, aceștia diferă de neurotransmițătorii clasici prin faptul că sunt sintetizați de toate tipurile de celule, transmit informații (semnale) prin difuziune atât în sens anterograd, cât și retrograd și nu au receptori specifici.

Plecând de la aceste particularități structurale și funcționale, transmițătorii chimici endogeni au fost recent clasificați în neurotransmițători (acetilcolină, catecolamine, serotonină, histamină, glutamat, GABA, glicină etc.) și gazotransmițători (CO, NO, H_2S). Noile date referitoare la existența difuziunii gazoase a semnalelor celulare demonstrează că problema transmiterii și comunicării intercelulare nu se limitează la mediația electro-chimică clasică, ci este mult mai complexă.

3.4. MODALITĂȚILE RĂSPUNSULUI NEURONAL POSTSINAPTIC

În funcție de natura mediatorului și a receptorilor din membrana postsinaptică, stimularea presinaptică poate genera două tipuri de răspuns postsinaptic:

a) *potențialul postsinaptic excitator (PPSE)* este un răspuns local de tip depolarizant, determinat de creșterea generală a permeabilității la Na^+ și K^+ . Potențialul de acțiune (PA), ca manifestare propagată, apare abia în momentul în care depolarizarea atinge valoarea prag necesară. În condiții fiziologice, capacitatea unui PPSE de a genera un PA depinde de plasarea sinapsei active. PPSE nu declanșează un PA decât dacă reușește să determine o depolarizare supraliminară a somei neuronale. Datorită distanței mari la care se află, sinapsele axo-dendritice nu sunt capabile să inducă izolat PA (să pună în activitate întregul neuron). Ele pot modifica, prin propagare electrotonică, potențialul de membrană din zonele alăturate, mărind astfel excitabilitatea la nivelul altor sinapse mai mult sau mai puțin apropiate. Excepție fac sinapsele de pe porțiunea inițială a dendritei.

Sinapsele axo-somatice, ca și cele axo-axonice, sunt capabile să genereze potențiale de acțiune propagate (denumite și *spike-uri somato-dendritice*). Cel mai bine plasate din acest punct de vedere sunt sinapsele din zona conului de emergență a axonului motor, unde pragul de excitație este în general mai scăzut;

b) *potențialul postsinaptic inhibitor (PPSI)* este o a doua modalitate de răspuns sinaptic, în cursul căruia, prin interacțiunea receptor-mediator, are loc o creștere exclusivă a permeabilității postsinaptice pentru K^+ și Cl^- , în timp ce permeabilitatea la Na^+ rămâne nemodificată. În acest mod apare o hiperpolarizare tranzitorie. Prin propagarea electrotonică, PPSI deprimă excitabilitatea zonelor din jur sau chiar a întregului neuron, împiedicând apariția PA sub efectul unor stimuli excitatori. Astfel de conexiuni reprezintă adevărate filtre ce modulează transmiterea în lanțurile neuronale;

c) *inhibiția presinaptică*: în cazul unor sinapse axo-axonice excitatoare, depolarizarea sinaptică se propagă electrotonic până la nivelul butonului terminal al axonului postsinaptic. Această depolarizare relativ persistentă reduce cantitatea de mediator eliberată din butonul terminal. Acest fenomen este denumit inhibiție presinaptică și se explică prin faptul că eliberarea mediatorului depinde de amplitudinea totală a depolarizării și bruschețea cu care aceasta se produce;

d) *inhibiția recurentă*: este vorba, de fapt, despre inhibiția chimică postsinaptică exercitată de un interneuron asupra unui axon cu care face sinapsă. Acest interneuron este activat de însăși activitatea

axonului ce urmează a fi inhibat sau a unui axon similar. Acești axoni stabilesc contacte sinaptice cu interneuronul inhibitor pe care îl pun în acțiune. În acest mod se realizează bucle de tipul conexiunii inverse ce controlează funcții nervoase importante (vezi datele privind circuitul stabilit prin neuronii Renshaw).

3.5. ELEMENTE DE MORFO-FIZIOLOGIE NEURO-MUSCULARĂ

Sistemul neuro-muscular este format din totalitatea structurilor musculare și a formațiunilor nervoase atașate lor.

În acest ansamblu, mușchii sunt considerați organe efectoare, iar formațiunile nervoase periferice – verigi de legătură prin care sistemul nervos central intervine în reacțiile complexe ale organismului față de mediul extern.

Ramificațiile axonale terminale ale neuronilor motori se distribuie fibrelor musculare prin intermediul joncțiunilor neuro-musculare, constituind ansamblul funcțional unitar cunoscut sub denumirea de „*unitate motorie*”.

Deși separate structural, elementele musculare și nervoase formează o unitate funcțională, a cărei activitate se manifestă sub cele mai diverse forme la nivel de organe și sisteme, asigurând o serie de funcții generale sau particulare:

- ca masă ce reprezintă 40% din greutatea totală a corpului, mușchii participă la evoluția anatomică și realizarea unei forme normale a întregului organism. Sedentarismul duce la involuție și atrofiere, cu implicații nefavorabile în toate compartimentele funcționale;

- ca element activ al aparatului locomotor, musculatura striată scheletică asigură deplasarea elementelor osoase pasive cu rol de pârghii în cadrul unor mișcări complexe.

Prin aceeași se realizează activitatea statică de postură și cea dinamică, cu deplasarea organismului (mers, fugă, salt), precum și diverse activități motrice (voluntare sau reflexe), cu participarea extremităților sau a altor compartimente funcționale, inclusiv vorbirea și o serie de funcții vitale (respiratorie, excretorie sau digestivă);

- sub aspect biologic, prin contracția realizată mușchii pot fi considerați veritabili „transformatori” de energie, convertind energia chimică potențială în cele mai diverse forme de energie actuală: mecanică, termică sau sonoră.

Diversele implicații funcționale vor fi analizate pe parcursul prezentării particularităților structural-funcționale ale mușchilor striati scheletici, atât pe mușchii izolați, cât și în ansamblul aparatului locomotor.

3.5.1. ARHITECTURA HISTO-FIZIOLOGICĂ A MUSCULATURII STRIATE

Mușchiul scheletic este constituit din fibre musculare care sunt elemente celulare multinucleate, de formă cilindrică, cu lungimea de la câțiva milimetri până la 50 cm.

Numărul celulelor musculare din componența unui mușchi rămâne invariabil de la naștere, însă volumul acestora ia diferite proporții, în funcție de mușchi, vârstă, solicitare fizică și stare de nutriție.

Alături de structurile funcționale comune oricărei celule, reprezentate prin membrană celulară (sarcolema), citoplasmă (sarcoplasmă) și nucleu, fibra musculară striată (multinucleată) prezintă ca elemente distincte: aspectul neomogen striat, determinat de prezența unui aparat contractil specific alcătuit din miofibrile; dispunerea periferică a nucleilor, ca urmare a diferențierii ontogenetice (fig. 3.23).

Datele morfo-fiziologice privind organizarea fibrei musculare au fost prezentate la capitolul de fiziologie specială.

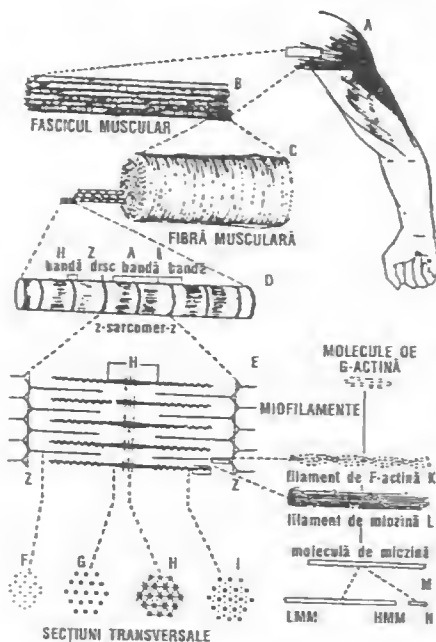


Fig. 3.23. Schema structurală și ultrastructurală a sistemului contractil muscular.

3.5.3. PROPRIETĂȚILE FIBREI MUSCULARE

Definirea cadrului funcțional al musculaturii în general, cu referire la fibra musculară striată, în special, se poate face printr-o succintă prezentare a proprietăților fundamentale legate de permeabilitate și polaritate electrică, excitabilitate, contractilitate, elasticitate și tonicitate, care permit înțelegerea rolului de propulsor activ al musculaturii în cadrul aparatului locomotor.

3.5.4. PERMEABILITATEA ȘI POLARITATEA ELECTRICĂ

Proprietate caracteristică a membranei celulare, permeabilitatea sarcolemei asigură o repartitie ionică particulară în compartimentele intra- și extracelulare, conferind polaritatea electrică ce caracterizează majoritatea structurilor excitabile.

Consecință directă a permeabilității membranare selective și întreținută de pompele ionice biologice de Na și K, polaritatea electrică stă la baza genezei potențialului membranar de repaus de -70-90 mV, precum și la impunerea unui anumit grad de excitabilitate a fibrei musculare (fig. 3.24).

De potențialul de repaus sarcolemic va depinde atât nivelul pragului de transmitere neuro-musculară a mesajului contractil, cât și a potențialelor de plăc sau de acțiune (propagate), implicate

3.5.2. TIPURI DE FIBRE MUSCULARE

Criterii de clasificare. Inițial, fibrele au fost clasificate în „roșii” și „albe”, pe baza culorii și a conținutului în mioglobină; acestea pot predomina la anumite categorii de mușchi sau pot coexista în proporții sensibil egale.

Recent, fibrele au fost clasificate pe baza proprietăților contractile și metabolice, astfel încât se pot distinge tipul I și tipul II.

1) *Fibrele de tip I* corespund categoriei clasice de „fibre roșii”, având un conținut crescut de mitocondrii, mioglobină, lipide și enzime oxidative. Generează o contracție lentă (timp de contracție 120 ms), iar producerea de ATP se face pe cale oxidativ-aerobă, datorită conținutului mare în mitocondrii la nivelul cărora se află enzime ale ciclului Krebs, ale beta-oxidării acizilor grași și ale fosforilării oxidative.

Aceste fibre prezintă o mare rezistență la oboseală și sunt capabile de eforturi moderate de lungă durată.

2) *Fibrele de tip II* au stocuri limitate de mitocondrii, mioglobină și lipide.

Distribuția fibrelor musculare. Concluzii asupra distribuției fibrelor musculare la un atlet sunt bazate pe o biopsie musculară și pe identificarea prin coloranți și markeri metabolici a următoarelor elemente:

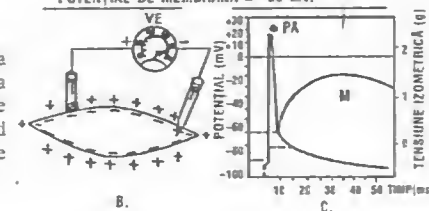
1) *enzimele dominante:* proporția relativă între succin dehidrogenază (oxidativă) și fosfofructokinază (glicolică);

2) *enzimele care reflectă viteza de contracție:* ATPaza miozică.

Fig. 3.24. Electrogenza în fibra musculară. A: Valorile potențialelor ionice de echilibru și transmembranare. B: Potențial de repaus înregistrat cu microelectrozi. VE, voltmetru. C: Traseele simultane ale contracției izometrice și ale potențialului de acțiune muscular. PR, potențial de repaus. PA, potențial de acțiune. M, miogramă.

IONI	A. CONCENTR. mM/l		POTENȚIAL DE ECHILIBRU (mV)
	INTRA-CELULAR	EXTRA-CELULAR	
Na ⁺	12	145	+65
K ⁺	155	4	-95
H ⁺	13×10 ⁻⁷	3,8×10 ⁻⁸	-332
Cl ⁻	3,8	120	-99
HCO ₃ ⁻	8	27	-32
A ⁻ (anion organic)	155	0	-

POTENȚIAL DE MEMBRANĂ = -90 mV.



3.5.5. EXCITABILITATEA

Ca proprietate comună a materiei vii, excitabilitatea fibrei musculare este definită prin capacitatea de a reacționa specific prin contracție alături de modificări de permeabilitate și polaritate electrică, acestea fiind fenomene inseparabile declanșării răspunsului de scurtare miofibrilară.

3.5.5.1. Rolul ionilor în generarea excitabilității musculare

a) *Ionul de K*, component major al fluidului intracelular, menține potențialul de repaus (care estimează potențialul de echilibru al potasiului).

Creșterea concentrației extracelulare a K determină modificarea potențialului de membrană conform legii lui Nernst (vezi capitolul Fiziologie generală).

b) *Ionul de Na*, component major al fluidului extracelular, menține presiunea osmotică în mediul extracelular.

Permeabilitatea membranei celulei musculare pentru Na este foarte scăzută în repaus, dar crește semnificativ în urma stimulării. Ionul de Na pătrunde masiv în celulă și această încărcare ionică depolarizează membrana.

Deoarece permeabilitatea la Na este voltaj-dependență, mai mulți ioni de Na pătrund în celulă în timpul depolarizării, în asemenea cantități încât se generează un proces autoîntreținut (de feed-back pozitiv), care se propagă de-a lungul membranei; procesul este calitativ identic cu potențialul de acțiune nervos.

Pentru o perioadă scurtă, interiorul celulei este pozitiv în raport cu exteriorul. După atingerea maximumului de depolarizare (overshoot), potențialul de membrană egalează potențialul de echilibru al sodiului. Permeabilitatea la Na scade rapid, simultan cu creșterea celei pentru K, și este inițiată repolarizarea.

c) *Ionul de Mg* intervine într-o serie de reacții enzimactice din cadrul metabolismului glucozei și ATPazei miozice.

d) *Ionul de Cl*, anion major în fluidul extracelular, urmează pasiv mișcarea transmembranară a cationilor și se distribuie conform echilibrului Gibbs-Donnan.

e) *Ionul de Ca* are un rol reglator în contracție. Prezența lui este necesară pentru a anula efectul inhibitor al miozinei asupra hidrolizei ATP.

În absența Ca (concentrații intracelulare sub 0,1 micromolar), tropomiozina blochează steric atașarea capului miozinei la actină de-a lungul întregului lanț de actină F. La fiecare 7 monomeri de actină F, troponina I este legată de actină și tropomiozina în absența calciului.

Legarea calciului la troponina C determină o modificare structurală în complexul troponinic, cu detașarea troponinei I de actină și tropomiozina. Acest fenomen permite tropomiozinei să se apropie de șanțul dintre cele două helixuri de actină și să permită interacțiunea miozinei cu actina (contracția musculară).

Date recente sugerează că, în absența Ca, complexul troponină-tropomiozină inhibă numai legarea puternică a miozinei de actină, nu și atașarea prin legături slabe.

Din toate tipurile de excitații utilizate în studiul excitabilității, cei electrici sunt cei mai adecvați din punct de vedere fiziologic, permițând o dozare în amplitudine, durată și frecvență care îngăduie definirea și măsurarea stării de excitabilitate a ansamblului neuro-muscular.

Tehnici de electrodiagnostic galvanofaradic și cronaximetric asociate cu cele de detecție (EMG) și stimulodetecție (vizează de conducere a influxului nervos) permit o explorare eficientă a sistemelor excitabile de tipul structurilor neuro-musculare.

3.5.5.2. Geneză și conducerea excitației în fibra musculară striată

Declanșarea stării de excitație în fibra musculară poate fi realizată natural prin intermediul influxului nervos, în cadrul transmiterii sinaptice, sau cu ajutorul stimulării electrice neuronale sau musculare.

a) **Transmiterea neuro-musculară.** În cazul excitației indirecte a ansamblului neuro-muscular, stimulul sau excitantul fiziologic final este reprezentat de impulsul nervos provenit din centrul motorii medulari sau supramedulari de origine reflexă sau voluntară.

Pentru a declanșa starea de excitație a fibrei musculare, stimulul fiziologic trebuie să străbată bariera sinaptică neuro-musculară la nivelul căreia eliberarea mediatorului chimic (acetilcolina) antrenează întreaga suită de fenomene caracteristice transmisiei colinergice, și anume:

- creșterea permeabilității membranei butonilor sinaptici axonali, cu eliberarea din veziculele sinaptice a unor cantități constante de acetilcolină, denumite cuante.

Numărul de cuante eliberate este dependent de nivelul influxului motor (intensitate, frecvență) și de prezența ionilor de Ca și a celor de Mg, respectiv facilitatori și inhibitori ai descărcărilor colinergice.

Un număr redus de vezicule sinaptice eliberează intermitent conținutul lor din terminațiile axonale nestimulate;

- eliberarea spontană cantitală de acetilcolină, urmată de legarea acesteia la receptori proteici colinergici ai plăcii terminale și producerea unui potențial miniatural de placă (MEPP), de aproximativ 0,5 mV. În același timp are loc o creștere a permeabilității membranei postsinaptice pentru ionii de sodiu, potasiu, calciu și NH_4^+ ;

- eliberarea unui număr crescut de cuante de ACh (din câteva sute de vezicule sinaptice), cu formarea complexelor receptor-ACh, determină prin creșterea permeabilității membranei postsinaptice la cationi o amplificarea a depolarizării până la un nivel critic de -40, -50 mV;

- declanșarea în consecință a unui potențial de acțiune propagat (120-130 mV) de-a lungul și în profunzimea fibrei musculare, cu o viteză de la 3-8 m/s (mușchiul de broască) și până la 12 m/s (la om).

Conducerea impulsului nervos necesită o anumită cantitate de ioni de Na^+ ($4 \cdot 10^{-12}$ M/cm²) intrați în sarcoplasmă și o cantitate echivalentă de ioni de K^+ eliberați în spațiul extracelular.

În timp ce răspunsul sub prag este decremental și strict localizat (nepropagat), potențialul de acțiune este autoregenerabil, fiind condus în ambele direcții de la zona stimulată, având o evoluție sub forma unei curbe caracteristice.

Aceasta prezintă o pantă ascendentă rapidă (*spike* cu *overshoot*) urmată de una descendentă de repolarizare rapidă (până la aproximativ -90 mV) și o repolarizare lentă (postpotențialele negative și pozitive), în care membrana rămâne ușor depolarizată timp de 0,25 s.

Potențialul rapid (*overshoot*) este generat la majoritatea speciilor de influxul rapid sodic, în timp ce repolarizarea rapidă este consecința unei rectificări întârziate (*delayed-rectification*), localizată la suprafața membranei și manifestată printr-o creștere a conductanței ionilor de K^+ (g_{K}).

Faza repolarizării lente pare să fie generată predominant la nivelul sistemului tubular transvers, prin acumularea în această zonă a ionilor de K^+ , corespunzând apariției rectificării lente de la sfârșitul ciclului potențialului de acțiune (*slow-rectification*).

Înlocuirea potasiului cu rubidiu sau distrugerea sistemului tubular transvers cu soluție Ringer hipertonică de glicerol este urmată de suprimarea postpotențialelor, fără afectarea fazelor inițiale ale PA

(*spike*; repolarizare rapidă); contribuția ionilor de clor rămâne, încă, controversată, reținându-se doar existența unei conductanțe de clor (g_{Cl}) pH-senzitive.

Odată eliberată prin influx nervos unic, la scurt timp după depolarizarea membranei postsinaptice sarcolemale, ACh este înlăturată de la nivelul plăcii motorii, în parte prin difuziune, în parte prin distrugerea de către ACh esteraza localizată în palisadele joncțiunii neuro-musculare.

Această distrugere permite o repolarizare rapidă a plăcii motorii necesară unei noi depolarizări, astfel încât răspunsul contractil este fin gradat în funcție de diferite frecvențe de stimulare.

Acetilcolinomimeticele, de tipul carbamilcolinei, mimează efectele acetilcolinei la nivelul plăcii motorii, dar având efecte mult prelungite prin inactivarea lor lentă sau chiar nulă de către colin esteraze. În doze crescute, pot deveni blocante printr-o depolarizare excesivă, determinând conversia gradată a complexului transmițător-receptor din forma activă în cea inactivă, disociată ulterior într-un receptor liber (desensibilizat), leni reversibil la receptorul inițial, activ.

b) **Tulburări de transmitere sinaptică.** Deficitul sau excesul unor enzime (ACh esteraza) sau al unor receptori determină tulburări grave ale transmisiei neuro-musculare, de tipul „miasteniei” sau „miotonei”.

Transmisia neuro-musculară poate fi blocată fie prin inhibarea eliberării de ACh din terminațiile nervului motor (toxina botulinică), fie prin împiedicarea acțiunii ACh asupra plăcii motorii. Ultimul efect apare fie prin competiție la nivelul receptorilor plăcii terminale (tubocurarina, fligidil), fie printr-o depolarizare excesivă (decametoniu și succinil-colina).

Inhibitorii de ACh esterază (anticolinesterazele), de tipul ezerinei (fisostigmina), neostigminei (prostigmina), diizopropilfluorofosfatului (DFP), tetraetilpirofosfatului (TEPP) și edrofoniumului (tensilon), prin inactivarea ACh esterazei și acumularea în consecință a ACh la nivel sinaptic, se opun tipului de blocare prin competiție, jucând rolul de anticurazante cu conservarea ACh. Tubocurarina pare să combată blocarea prin depolarizare excesivă, ca și substanțele menționate mai sus în doze excesive. În acest sens, DFP devine periculos prin inactivarea ireversibilă a ACh esterazei pentru câteva săptămâni, față de cea temporară (câteva ore), realizată de fisostigmină sau neostigmină (folosite astfel în diagnosticarea și tratamentul miasteniei gravis).

Efectul benefic al blocanților neuro-musculari anticolinesterazici este justificat prin acumularea unei cantități suficiente de ACh care să restaureze nivelul normal al transmisiei neuro-musculare, deficitar în miastenia gravis prin deprimarea funcției receptoare colinergice de prezența unor anticorpi anti-receptori postsinaptici.

În clinică, substanțele blocante ale transmisiei neuro-musculare sunt utilizate pentru a obține o relaxare musculară în timpul intervențiilor chirurgicale sau al unui experiment, sau pentru a diminua agitația în tratamentul psihozelor prin electroșoc.

c) **Particularități ale excitabilității neuro-musculare.** Masa musculară, formată dintr-un ansamblu de fibre musculare cu excitabilitate heterogenă, manifestă o gradare a efectului mecanic: fibra musculară izolată sau unitatea motorie declanșează un răspuns maximal odată ce pragul liminal a fost atins, conform legii „tot sau nimic” (Bowditch și Bayliss), valabilă de asemenea pentru fibra miocardică și cea nervoasă.

Generarea potențialului de acțiune în fibra musculară se însoțește de variații tranzitorii ale excitabilității neuro-musculare: inițial, o perioadă de inexcitabilitate absolută (perioada refractară absolută), urmată de o creștere și de o scădere a acesteia (perioada refractară relativă).

Perioada refractară face imposibilă o stare de excitație continuă a nervului și mușchiului (prin sumarea sau fuzionarea stimulilor), explicând noțiunea de *labilitate neuro-musculară*.

Valoarea acesteia este în jurul a 100 c/s pentru mușchi și 500 c/s pentru nervi, ținând seama de durata potențialelor de acțiune și a modificărilor de excitabilitate care le însoțesc.

Pentru a obține contracții unice (secuse), fuzionate parțial (tetanos imperfect) sau total (tetanos perfect), intervalul dintre stimuli nu poate fi mai mic decât perioada refractară absolută.

d) **Hipersensibilitatea de denervare neuro-musculară.** Distrugerea inervației musculare (prin secționare sau alte mijloace fizico-chimice) antrenează, pe lângă atrofia musculară, o excitabilitate anormală a mușchiului prin creșterea sensibilității la acetilcolină.

Hipersensibilitatea de denervare (limitată la nivelul structurilor deservite de neuronii distruși) se explică prin fenomenele de „eliberare” a centrilor subiacenți de acțiunea moderatoare a celor supraiacenți. Cauza hipersensibilității de denervare rămâne încă obscură, aceasta fiind asociată la mușchii scheletici cu

creșterea zonei sarcolemice sensibile la acetilcolină, care în mod normal este limitată la nivelul plăcii motorii.

Apariția fibrilației (constricții neregulate ale fibrelor izolate) la mușchiul scheletic denervat are loc în intervalul de trei săptămâni după leziunea nervoasă, iar dispariția acesteia și a hipersensibilității de denervare se produce simultan cu regenerarea nervului.

Atrofia care însoțește hipersensibilitatea de denervare a mușchiului scheletic nu apare la nivelul mușchiului neted, a cărui inervație este exclusiv de natură vegetativă simpatico-parasimpatică.

Modificările de excitabilitate, de activitate electrică, de tonicitate și contractilitate sunt particulare diferitelor afecțiuni neuro-musculare (pareze, paralizii, atrofii), având drept urmare afectarea posturii și locomotiei umane.

3.5.6. CONTRACTILITATEA

Având ca substrat morfologic aparatul contractil miofibrilar, contractilitatea se reflectă în capacitatea mușchiului de a dezvolta o tensiune mecanică la extremitățile sale. Se poate însoși de scurtarea lungimii mușchiului și de alte manifestări fizico-chimice (electrice, biochimice, acustice, termice) și histo-morfologice asociate procesului contractil.

3.5.6.1. Bazele celulare ale contracției musculare

Declanșarea procesului contractil propriu-zis este precedată de o serie de fenomene: (1) generarea mesajului contractil prin acțiunea unor factori endogeni (neuro-umoral-metabolici) sau exogeni (diverși stimuli somato-senzitiv-senzoriali) pe cale reflexă sau voluntară; (2) conducerea lui pe căile motorii la ansamblul unităților motorii; (3) traversarea barierei neuro-musculare prin fenomenele de transmisie colinergică; (4) depolarizarea sarcolemei musculare, cu generarea unui potențial de acțiune propagat.

Ulterior, prin mecanismul de cuplare a excitației cu contracția se antrenează o serie de fenomene mecano-chimice ale ciclului contracție-relaxare, care utilizează energia furnizată de sistemul energogen contractil în prezența ionilor de calciu.

Aceste fenomene sunt însoțite de modificări ultrastructurale ale proteinelor contractile miofibrilare, manifestări energetice, mecanice, termice și acustice.

Faza posicontractilă de relaxare este însoțită de fenomene de refacere legate de: pomparea ionilor de Ca în reticulul sarcoplasmatic; eliminarea interacțiunilor proteinelor contractile; refacerea rezervelor energetice fosfat-macroergice; plădirea unei datorii de oxigen contractate în suprasolicități epuizante.

Din multitudinea etapelor menționate mai sus, cele legate de cuplul excitație-contracție-relaxare, furnizarea energiei contractile și manifestările care o însoțesc rețin în mod deosebit atenția.

a) **Cuplul excitație-contracție-relaxare (ECR).** Acest proces de cuplare electro-mecanică definește lanțul de fenomene care realizează legătura funcțională dintre sarcolema excitată prin mesajul contractil motor și substratul contractil miofibrilar, și care constă din: depolarizarea sarcolemei; generarea și propagarea unui potențial de acțiune de-a lungul sarcolemei și al tubilor transversali; eliberarea calciului din cisternele reticulului sarcoplasmatic (RS); difuziunea sarcoplasmatică a ionilor de calciu și legarea lor la receptorii C-troponinici; anularea efectului inhibitor al-troponinei I asupra interacțiunii acto-miozinice; interacțiunea acto-miozică cu glisarea filamentelor subțiri printre cele groase; scurtarea sarcomerului, având drept rezultat declanșarea, întreținerea și întreruperea contracției exprimată prin ciclul „contracție-relaxare”.

Microscopia electronică arată că între capetele tubilor T și cisternele terminale există un spațiu foarte mic (5 nm).

Chandler și Schneider (1976) au sugerat că atunci când potențialul de acțiune ajunge la nivelul tubilor T se produce un transfer de sarcini, care determină modificări conformaționale ale cisternelor terminale și deschiderea canalelor ionice cu eliberarea masivă a ionilor de calciu din cisterne în sarcoplasmă (fenomen

demonstrat prin utilizarea aequorinei, care dă un efect luminiscent direct proporțional cu concentrația Ca^{2+} (Best și Taylor, 1991).

Creșterea concentrației ionilor de Ca de la 10^{-7} M din repaus la $2 \cdot 10^{-5}$ M antrenează punerea în joc a unor procese mecano-chimice care stau la baza activării aparatului contracției și a sistemului energogen: legarea Ca de troponina C, mobilizarea moleculei de tropomiozină la nivelul filamentelor subțiri, interacțiunea actinei cu miozina, hidroliza ATP și contracția propriu-zisă (fig. 3.25).

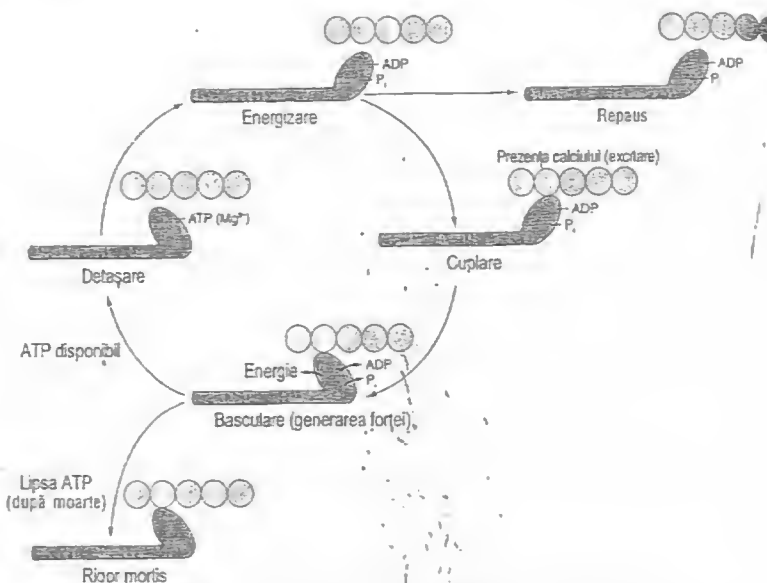


Fig. 3.25. Reprezentare schematică a mecanismului contractil glisat.

Lipsa complexului calciu-troponin C și, deci, prezența poziției inhibitorii a tropomiozinei pe actină blochează interacțiunea actină-miozină, aspect caracteristic stării de relaxare. Prezența calciului drept cuplant al excitației la contracție este explicată prin intervenția sa mediată de troponina C via tropomiozină în declanșarea interacțiunilor ciclice actină-miozină, care au făcut obiectul unor mult-controverse teorii ale contracției musculare (teoria vâsco-elastică, teoria corpului elastic, teoria filamentului continuu, teoria glisării filamentelor sau cea a punților transversale – model Huxley-Simmons).

În acord cu caracterul reversibil al evenimentelor ciclice menționate în condiții normale, relaxarea este posibilă în condiții de repolarizare, prin captarea Ca^{2+} de către RS și disocierea Ca^{2+} de pe situsurile de cuplare cu troponina C.

Odată ce concentrația ionilor de Ca în afara reticulului sarcoplasmatic a scăzut sub 10^{-7} M/l, interacțiunea chimică dintre actină și miozină încetează, prin interferarea punților transversale de către tropomiozină, favorizând astfel relaxarea mușchiului.

Dacă transportul activ de Ca este abolit, nu se mai produce relaxarea, rezultând o contracție susținută (contractură).

b) **Fenomene mecano-chimice ale ciclului contracție-relaxare.** În starea de repaus, structurile miofibrilare se găsesc în stare de relaxare parțială, caracteristică stării de tonicitate a țesutului muscular.

Concentrația joasă a Ca^{2+} în sarcoplasmă (10^{-8} M) nu permite interacțiunea dintre proteinele componente ale filamentelor subțiri (actină, troponină, tropomiozină) și filamentele groase (miozină), conform mecanismelor deja menționate.

La concentrații foarte mici de Ca^{2+} , componenta meromiozinei grele de la extremitatea punților transversale ale filamentelor groase prezintă o activitate ATPazică foarte redusă, dată fiind interferarea lor de către filamentele de tropomiozină cuplate cu cele de troponină T și I într-o conformație inhibitoare corespunzătoare sechestrării ionilor de calciu la nivelul benzii A de către RS longitudinal.

Creșterea concentrației ionilor de Ca^{2+} la 10^{-5} M, în urma eliberării din cisternele triadei, și legarea lui de troponina C permit creșterea interacțiunii acto-miozinice, prin anularea conformației inhibitoare a tropomiozinei și creșterea activității ATPazei miozinice. Aceasta determină hidroliza ATP la nivelul locului catalitic de pe subfragmentul S_1 al meromiozinei grele (HMM). Energia degajată este utilizată pentru activarea mecanismului glisant.

Complexul creat prin unirea calciului cu troponina C determină, pe de o parte, activarea actinei (polimerizarea de la forma globulară la cea fibrilară) și, pe de altă parte, anularea interferării de către tropomiozină a interacțiunii actină-miozină, prin deplasarea acesteia de pe filamentele de actină.

După teoria glisării filamentelor (Huxley), odată interacțiunea declanșată, are loc constituirea între actină și miozină a unor legături ciclice temporare prin atașarea articulațiilor mobile ale punților transversale de meromiozină grea la filamentele de actină, deplasarea miozinei pe actină urmată de detașarea ei și atașarea ulterioară pe situsuri învecinate (fig. 3.26).

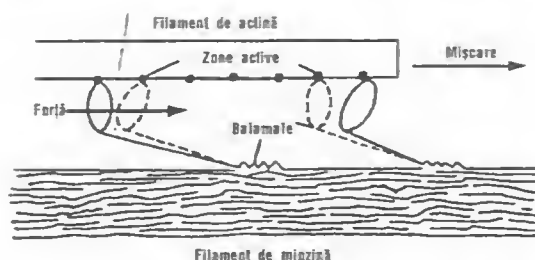


Fig. 3.26. Interacțiunea actină-miozină în timpul contracției musculare.

factorului de relaxare Marsh-Bendall; $3,5'$ -cAMP exercită efectele relaxante la concentrații scăzute de calciu.

Diversitatea opiniilor existente în prezent confirmă complexitatea mecanismului contracției musculare. Afirmația făcută cu aproape 40 de ani în urmă de Engelhardt, conform căreia „au existat probabil tot atâtea teorii asupra contracției musculare câți cercetători s-au ocupat de acest subiect”, își păstrează valabilitatea până în prezent.

3.5.6.2. Sistemul energogen al contracției musculare

Energia necesară contracției musculare este furnizată de glicogenoliză. Călea după care se efectuează degradarea glicogenului și glucozei variază după condițiile de oxigenare a mușchiului: calea anaerobă asigură generarea doar a 2 molecule de ATP, în timp ce condițiile aerobe cresc la 38 numărul de molecule de ATP ca principală sursă instantanee de energie pentru contracția musculară. Metabolismul glucozei pe calea șuntului pentozei este neglijabil în mușchiul scheletic.

Refacerea ATP implică fosforilarea ADP. Resinteza rapidă a ATP este asigurată de transferul grupărilor fosfat de la creatinin fosfat către ADP, reacție catalizată de creatin kinază. Creatin fosfatul este regenerat prin transferul de grupări fosfat de pe ATP către creatină.

Rezultă o glisare a filamentelor de actină printre cele de miozină și scurtarea ansamblului de sarcomere.

După readucerea polarizării la starea normală, Ca^{2+} revine în reticulul sarcoplasmatic, iar Mg^{2+} pe factorul Marsh-Bendall, punțile se detașează, fără a se reatașa, și are loc relaxarea musculară.

Evoluția ciclului „contractie-relaxare” în faza de relaxare necesită prezența unor agenți plastifianți, printre care ATP este indispensabil pentru desfăcerea complexului acto-miozinic și pentru depolimerizarea actinei. De asemenea, sistemul enzimatic cu rol de „pompă activă” de Ca^{2+} permite reactivarea

În acest fel, un al doilea compus macroergic, creatin fosfatul, este generat în timpul refacerii musculare.

ATP și creatin fosfatul sunt forme de stocare de energie ce pot fi utilizate mult mai rapid decât dacă ATP ar proveni din procesele lente de fosforilare oxidativă.

Reacțiile care duc la transferul grupării fosfat de pe creatin fosfat pe ADP se realizează fără consum de oxigen (proces neoxidative).

Din cauza cantității limitate de creatin fosfat din mușchi, acesta este epuizat după câteva secunde de contracție intensă.

Energia necesară pentru formarea de compuși macroergici (ATP și creatin fosfat) este asigurată de glicoliză și oxidarea acetil CoA în ciclul acizilor tricarboxilici asociat cu fosforilarea oxidativă în lanțul respirator (fig. 3.27).

Energia necesară mușchiului poate fi furnizată și de acizi grași și aminoacizi. Mușchiul în repaus nu necesită degradarea metabolică a glicogenului.

Glicoliza reprezintă degradarea glucozei până la stadiul de acid piruvic. Are loc în sarcoplasmă și enzimele implicate fac parte din fracțiunea proteică solubilă a mușchiului.

În cursul glicolizei, cunoscută ca ciclul Embden-Meyerhoff, se sintetizează două molecule de ATP pentru fiecare moleculă de glucoză degradată:



Ciclul acizilor tricarboxilici (Krebs) și fosforilarea oxidativă: ciclul Krebs se produce în mitocondrii și constă dintr-un ciclu de reacții chimice prin care acetil CoA este oxidată la CO_2 și H_2O cu refacerea CoA. Acidul piruvic este oxidat într-o serie de reacții ce implică mai multe enzime și patru cofactori ce formează complexul dehidrogenazei acidului piruvic.

Reacțiile din ciclul acizilor tricarboxilici sunt cuplate cu lanțul respirator, format dintr-o succesiune de transportori de protoni și electroni localizați, de asemenea, în mitocondrie. La acest nivel se realizează fosforilarea oxidativă a ADP la ATP.

Contracția musculară apare din punct de vedere energetic ca o succesiune de reacții producătoare de energie, de viteză variabilă și reversibile în timp. Această succesiune poate fi pusă în evidență urmărind variațiile pH-ului local în timpul contracției:

- faza alcalină, precontractilă, de semnificație necunoscută;
- faza de acidifiere, corespunzătoare scindării ATP;
- faza de alcalinizare, corespunzătoare eliberării funcției baze a creatinei prin scindarea fosfagenului necesar refacerii ATP;
- faza de acidifiere, corespunzătoare creșterii producției de acid piruvic și acid lactic, cu eliberarea energiei necesare refacerii fosfagenului și parțial a glucozei.

Din punct de vedere termodinamic, energia furnizată mușchiului trebuie să fie egală cu cea pe care el o eliberează sub formă de lucru mecanic, legături fosfat macroergice și căldură. Randamentul mecanic al mușchiului, exprimat prin procentajul energiei chimice a nutriențelor, utilizat pentru activitatea musculară, ajunge până la 20-25% în condiții optime, 75-80% din energie fiind eliberată sub formă de căldură.

3.5.6.3. Manifestări termice

Căldura eliberată de mușchi este reprezentată de mai multe componente asociate stării de repaus sau diferitelor faze ale ciclului contracție-relaxare:

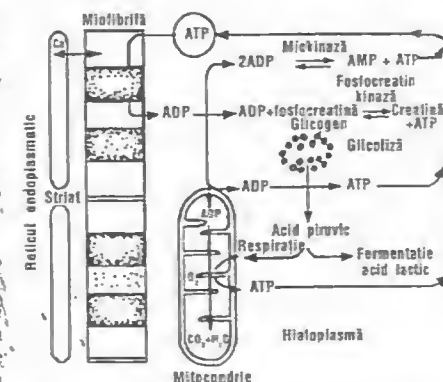


Fig. 3.27. Sistemul energogen al contracției musculare.

– *căldura de repaus* reprezintă o manifestare exterioară a proceselor metabolice de repaus amintite mai sus;

– *căldura inițială* reprezintă energia calorică eliberată în timpul contracției și divizată, la rândul ei, în două componente: căldura de activare, corespunzătoare mușchiului în contracție, și căldura de scurtare, corespunzătoare unor modificări ale structurilor musculare:

• *căldura de activare* apare în 10–15 ms de la stimulare și este maximă la 20–30 ms. Ea reflectă:

a) eliberarea ionilor de Ca^{2+} și interacțiunea cu proteinele contractile;

b) scurtarea internă și efectele termoelastice la nivelul sistemului, care au loc în condiții „izometrice”.

Aceasta este suplimentată de o fază de producție „labilă” a căldurii (cu timp de înjumătățire de 1,5 s), corelată cu viteza mișcării, și o fază de producție „stabilă” (care continuă și pe durata unei contracții susținute, tetanice), reflectând ineficiența transferului energiei ATP la legăturile acto-miozinice;

• *căldura de scurtare*: prima constatare a apariției căldurii de scurtare a fost sesizată de Fenn: această etapă apare ca o fază secundară, proporțională cu lucrul mecanic extern executat.

Se presupune că este o formă de lucru vâscos intern, efectuat în momentul glisării filamentelor pe o distanță considerabilă;

– *căldura de elongare*: dacă mușchiul a efectuat lucru mecanic contra gravitației (de exemplu, ridicarea unei greutate) va fi necesară o cantitate suplimentară de energie pentru a asigura coborârea precisă a greutății. Cu alte cuvinte, mușchiul va continua să se contracte chiar în momentul alungirii lui de către încărcarea externă;

– *căldura de recuperare*: la sfârșitul contracției există o fază de recuperare, care reflectă ineficiența proceselor aerobe care utilizează glicogen și lipide pentru refacerea rezervelor inițiale de fosfagen (ATP și fosfocreatină) în interiorul mușchilor activi;

– *căldura de refacere (revenire)*: corespunde proceselor metabolice care readuc mușchiul la starea de repaus și se prelungește încă aproximativ 30 de minute postcontracție, fiind egală în valoare cu căldura inițială.

3.5.6.4. Manifestări electrice musculare

Sunt rezultatul depolarizării sarcolemei fibrelor musculare de la nivelul unităților motorii, fenomen declanșat de mesajul colinergic codificat în frecvență.

Potențialele de acțiune generate reprezintă condiția primară a desfășurării activității contractile musculare în condițiile întregului organism, fie izometrică (de postură), fie izotonică (locomotorie).

Captate de la nivelul unității motorii prin electrozi coaxiali sau de la nivelul unor zone musculare mai întinse cu ajutorul electrozilor de suprafață, biopotențialele sunt înregistrate sub denumirea de electromiogramă (EMG), respectiv elementară sau globală.

3.5.7. ELASTICITATEA

Capacitatea mușchiului de a se alungi în anumite limite și a reveni la dimensiunea inițială după încetarea forței de întindere definește elasticitatea musculară.

În stare de repaus, mușchiul se află în mod normal sub o tensiune ușoară, determinată de proprietatea sa de tonicitate; secționarea tendoanelor determină o scurtare moderată.

Lungimea mușchiului relaxat suficient, cu o tensiune de repaus nulă, reprezintă „lungimea de repaus”, apropiată de valoarea extensiei maximele posibile în condiții naturale. Capacitatea maximă de contracție a mușchiului este în mod specific legată de lungimea inițială.

Dacă forța aplicată depășește limitele elasticității perfecte, chiar și *in situ*, mușchiul poate păstra ulterior o anumită deformare. La o întindere de trei ori mai mare decât lungimea de echilibru, mușchiul scheletic se rupe.

Elasticitatea mușchiului joacă rol de amortizor în vederea evitării unor rupturi consecutive contracțiilor bruște. Pe de altă parte, permite fuzionarea secuselor elaborate din contracția tetanică a mușchiului, mărind randamentul mașinii musculare.

3.5.8. TONICITATEA

Ca una dintre proprietățile direct legate de funcția contractilă, tonicitatea musculară reprezintă acea stare de tensiune (semicontrație) caracteristică mușchilor situați în organismul intact.

3.5.8.1. Mecanisme tonigene

Hipotonia urmată de atonie (determinate de separarea mușchiului de inervația sa prin traumatisme sau secțiunea nervilor) sau stările de hipertonie/spasticitate din anumite leziuni nervoase atestă rolul principal pe care-l are sistemul nervos în producerea mecanismului tonigen.

Originea acestui mecanism se află în reflexul medular miotatic (de întindere).

Arcul reflex miotatic este compus din fusul neuro-muscular ca element receptor, aferențe senzitive de tip Ia și II, centri medulari (moto-neuroni alfa și gamma), căi eferente ale fibrelor musculare extrafusale și, respectiv, intrafusale.

Unele detalii structurale și funcționale, legate de fusul neuro-muscular și alte relee tonigene, sunt prezentate în cadrul mecanismelor posturii și locomotiei.

Fusul neuro-muscular are rol în controlul nervos inconștient al contracției musculare, în cursul mișcării și al contracției statice susținute, cu participarea aferențelor Ia și a buclei gamma cu cele două tipuri de fibre (extra- și intrafusale).

Cele două tipuri de motoneuroni alfa (tonici și fazici) sunt supuși la influențe facilitatoare (provenite pe calea aferențelor fusale și supramedulare – căi vestibulo-spinale, sistem reticulat facilitator descendent) și inhibitoare locale (aferențe Ib de origine tendinoasă, circuitul Renshaw).

Influențelor inhibitoare locale li se adaugă cele venite de la etajele supramedulare: căi rubro-spinale, nucleu caudat, lob anterior al cerebelului, cortex frontal, sistem reticulat inhibitor descendent.

Fusurile neuro-musculare nu funcționează în condiții extreme, ci sunt supuse permanent unor tracțiuni ușoare. Prin emiterea continuă de salve de impulsuri cu frecvență variabilă spre motoneuronii medulari, se creează o așa-numită „presiune de depolarizare”.

În momentul în care aceasta atinge un nivel critic sunt stimulați motoneuronii, antrenând contracția fibrelor musculare ale unității motorii; rezultă o tensiune slabă și permanentă ce caracterizează tonusul muscular.

În afara receptorilor fusali și tendinoși cu roluri tonigene bine stabilite, în prezent se discută despre existența unor tipuri speciale de receptori: cutanați, articulari, receptori profunzi ai membranelor interosoase, terminații nervoase intramusculare, receptori viscerali. Aceștia par să genereze o serie de modulări tonice prin mecanisme sinaptice medulare puțin cunoscute.

Reflexul miotatic se află sub influența centrilor supramedulari localizați în trunchiul cerebral, nucleii bazali, formațiunea reticulată, cortexul frontal și cerebel.

Date privind intervenția unor astfel de mecanisme tonigene au fost obținute pe preparate animale (decerebrate sau decerebelate), pe secțiuni ale axului cerebro-spinal sau în clinică, direct prin explorarea reflexelor tonice.

Orice experiență neurofiziologică modernă duce la concluzia că tonusul este rezultanta activității sincrone, de origine reflexă, a mai multor unități motorii. Nu se poate încă preciza dacă aceleași unități funcționează mereu, realizând anumite „grupări strategice” în cadrul mușchiului, sau dacă unitățile intră în joc pe rând.

Faptul că tonusul este un fenomen continuu este demonstrat de existența proprietăților visco-elastice ale fesutului muscular, care transformă influențele discontinue tonigene într-o tensiune permanentă strict dependentă de starea funcțională a mușchiului.

3.5.8.2. Implicații funcționale

Tonusul de fond, postură sau expresie joacă un rol primordial în activitatea musculară de efectuare a unor mișcări complexe, asigurând fixitatea articulațiilor și amortizarea elastică a mișcărilor.

Creșterea tonusului muscular și transformarea lui într-un frison generator de căldură sugerează implicarea în termoreglare.

Stări emoționale stresante (anxietate, excitație, frică) măresc tonusul muscular de fond prin creșterea descărcărilor nervoase tonice.

În timpul somnului, influxurile tonice devin foarte rare, sugerând implicarea acestuia în menținerea „stării de veghe”, al cărei mecanism este abordat la fiziologia euefalului.

3.6. MUȘCHIUL NETED

3.6.1. GENERALITĂȚI. CLASIFICARE

Mușchii netezi sunt formați din fibre mici de 2–5 μm diametru și 50–20 μm lungime, uninucleate, cu o organizare a aparatului contractil foarte diferită de cea a mușchiului striat. Deși mușchii netezi au particularități morfo-funcționale ce diferă de la un organ la altul, ei pot fi în general clasificați în două categorii principale: mușchii netezi multiunitari și mușchii netezi viscerali.

Aceștia formează sinciții funcționale, fibrele musculare fiind unite în fascicule sau pături în care membranele musculare intră în contact formând joncțiuni („gap junction” sau *nexus*). Prin intermediul joncțiunilor se pot produce fluxuri ionice intercelulare. Fibrele nu au inervație motorie individuală, iar stimulii se propagă de la o fibră la alta cuprinzând porțiuni largi sau chiar întreg mușchii care acționează ca o unitate (mușchi unițari). Prezența joncțiunilor permite propagarea electrotonică a potențialelor de acțiune. Astfel de mușchi se întâlnesc în tubul digestiv, canalele biliare, uretere, uter etc. Pot prezenta activitate automată.

Aceștia formează mușchii ciliari, irisul, mușchii piloerectori și musculatura netedă a unor vase mari. Sarcolema acestor fibre este izolată, ca și la mușchii striați, de un strat glicoproteic, iar inervația este asigurată, în majoritatea cazurilor, de fibre nervoase individuale. Activitatea lor este individuală și controlată prin semnale nervoase. Nu prezintă contracții spontane.

3.6.2. MODALITĂȚI DE EXCITARE A MUȘCHILOR NETEZI

Excitarea miocitelor netede se realizează prin două tipuri majore de mecanisme: (1) mecanisme bazate predominant pe depolarizarea membranei, ce includ potențiale de acțiune și depolarizări globale ale membranei (generate prin mecanisme nervoase sau de alt tip) și (2) mecanisme hormonale bazate pe sistemele de mesageri secundari, care implică depolarizarea membranelor în măsură variabilă de la un caz la altul (fig. 3.28).

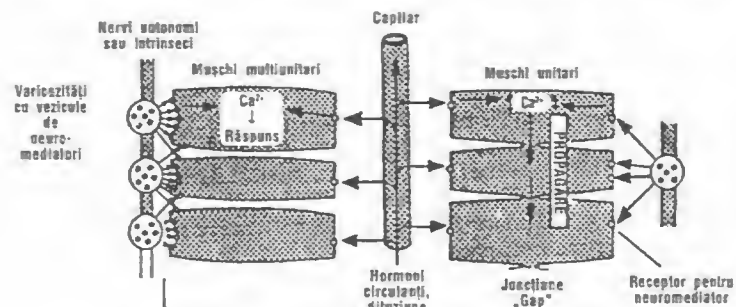


Fig. 3.28. Sistemele de control în mușchiul neted (adaptat după Best și Taylor, 1992).

3.6.2.1. Mecanisme membranare depolarizante

În condiții de repaus normal, potențialul de membrană al fibrei musculare netede este de 50–60 mV (cu cca 30 mV mai redus decât cel al fibrelor striate scheletice).

Potențialele de acțiune ce se produc doar în mușchii netezi de tip visceral pot fi de două tipuri:

– *potențiale de acțiune tipice*, asemănătoare celor din fibra musculară scheletică, dar cu o durată mare, de 10–50 ms;

– *potențiale de acțiune cu platou*, a căror etapă de depolarizare evoluează ca în cazul celor tipice dar care, în loc să prezinte o repolarizare rapidă, se repolarizează lent, astfel încât membrana rămâne depolarizată timp de câteva sute sau chiar mii de ms. Existența acestui platou explică durata mare a contracțiilor ce apar în unele tipuri de mușchi neted visceral (ureteral, uterin, vascular). Astfel de potențiale se întâlnesc și în mușchiul cardiac.

Durata mare a potențialelor de acțiune din fibrele musculare netede se explică prin faptul că depolarizarea se realizează în mare măsură cu participarea fluxurilor de calciu. În sarcolema mușchiului neted, canalele de Ca^{2+} voltaj-dependente au o densitate mult mai mare în comparație cu mușchiul striat. Stimularea determină pe lângă influxul de Na^+ și un influx de Ca^{2+} . Canalele de Ca^{2+} , având o constantă de deschidere mult mai mare decât cele de Na^+ , determină prelungirea potențialului de acțiune.

În unele tipuri de mușchi netezi viscerali apare o activitate electrică membranară spontană, reprezentată de *unde lente de depolarizare*, capabile să genereze spontan potențiale de acțiune. Aceste unde își au originea în așa-zisii „*pacemaker-i*” – fibre și grupuri de fibre caracterizate prin oscilații ale conductanței ionice sau variații ale vitezei de pompare activă a Na^+ spre exterior. Aceste depolarizări, deși *per se* nu pot provoca contracții, sunt capabile în momentul când depășesc pragul de excitație (cca 35 mV) să declanșeze potențiale de acțiune propagate (cu o viteză de 5–10 $\mu\text{m/s}$) și contracții ritmice.

O altă particularitate a excitabilității în cazul mușchilor netezi este așa-zisa *stimulare prin întindere*. Numeroși mușchi viscerali răspund la întindere prin generarea unor potențiale de acțiune spontane ce determină contracția. Această particularitate asigură rezistența pereților și evacuarea organelor cavitare la distensii prin conținut excesiv (vezi detalii la capitolule de motricitate digestivă, fiziologia circulației etc.).

În cazul mușchilor netezi multiunitari, nu se produc decât rareori potențiale de acțiune. Impulsul nervos determină descărcarea de mediatori (acetilcolină, adrenalină etc.) care depolarizează membrana mușchiului neted, declanșând contracția fără apariția unor potențiale de acțiune. Potențialele de acțiune individuale nu se pot produce deoarece fibrele musculare sunt prea mici. Inervația mușchiului neted se realizează prin fibre nervoase vegetative. În cazul mușchiului neted visceral, fibrele nervoase formează rețele la suprafața mușchiului fără a intra în contact direct cu fibrele musculare. În aceste *joncțiuni difuze*, mediatorul chimic este eliberat la distanțe relativ mari (nanometri sau chiar micrometri) și difuzează apoi spre fibrele musculare. Eliberarea mediatorului se face la nivelul varicozităților ce se succedă de-a lungul traiectului nervos. În cazul mușchiului multiunitar, varicozitățile formează așa-zisele *joncțiuni de contact*, în care apare un spațiu sinaptic.

Mediatorii chimici cei mai răspândiți în cazul mușchilor netezi sunt acetilcolina și noradrenalina. Acțiunea acestor substanțe diferă în funcție de tipul de receptori ce sunt activați la nivelul sarcolemei. Când receptorul este excitator, se produce o depolarizare lentă (potențial joncțional excitator), care, dacă atinge pragul de excitație, poate genera un potențial de acțiune. În cazul prezenței receptorilor inhibitori, se produce o hiperpolarizare a membranei. Astfel se explică cum același mediator poate determina excitație și contracție în anumite teritorii și inhibiție cu relaxare în altele teritorii.

3.6.2.2. Mecanisme hormonale

Contracția mușchiului neted poate fi declanșată sau inhibată în absența oricărui influențe nervoase și fără apariția unor potențiale de acțiune. În acest sens pot fi menționate efectele unor factori locali (CO_2 , O_2 , acid lactic, K^+) și ale unor hormoni circulanți sau locali (noradrenalină, adrenalină, histamină, ocitocină, serotonină etc.), care determină direct sau, mai ales, prin receptori excitatori sau inhibitori contracții și,

respectiv, relaxări, fără variații semnificative ale potențialului de membrană. În cazul hormonilor, cuplarea cu receptorii specifici din sarcolemă duce la activarea unor mesageri secunzi, de exemplu: sistemul adenilat ciclază – cAMP), care determină eliberarea Ca^{2+} din depozite, deschiderea canalelor de Ca^{2+} și contracția (pentru detalii vezi, de exemplu, reglarea activității vasculare).

3.6.3. MECANISMUL CONTRACTIL ÎN MIOCITUL NETED

3.6.3.1. Introducere

Mușchiul neted nu prezintă aspectul striat, caracteristic mușchiului scheletic. În organism, mușchiul neted este localizat vascular sau oon-vascular, în peretele viscerelor cavitare (gastro-intestinal, traheo-bronșic, uretero-vezical, tubar-uterin) sau în structurile globului ocular (iris, mușchi ciliar). Funcția contractilă a miocitelor netede din structuri de tip parietal este de a controla tensiunea mecanică parietală și volumul cavitat, cu implicații fiziologice diverse legate de localizările menționate, cum ar fi reglarea presiunii arteriale și a debitului sanguin local, amestecarea și propulsia conținutului digestiv, ce sunt descrise la capitele respective. Activitatea contractilă a mușchiului neted este sub control voluntar, ci este controlată de sistemul nervos vegetativ, precum și de hormoni, agenți autocrini/paracrini și alte semnale chimice locale. Contractilitatea mușchiului neted trebuie neapărat privită în contextul de simbioză, care însă este mult mai complexă decât în miocard, implicând și endoteliul. Calciul și moleculele mici (inozitol trifosfat, nucleotide ciclice) pot trece prin joncțiunile comunicante (*gap*); cuplarea homocelulară permite amplificarea și prelungirea semnalului de calciu, iar cea heterocelulară (cu celulele endoteliale) poate avea efecte modulatorie deosebit de complexe.

3.6.3.2. Fluxurile de calciu în miocitul neted

În celulele musculare netede, cuplarea dintre excitație și contracție este asigurată de creșteri ale concentrației citosolice de calciu (fig. 3.29). La fel ca în alte tipuri celulare, această concentrație este în domeniul submicromolar în repaus, fiind menținută prin permeabilitatea extrem de redusă a plasmalemei pentru calciu, combinată cu activitatea mecanismelor de extruzie a calciului, respectiv pompa de calciu plasmalemală și reticulară și antiportul sodiu/calciu. Toate sectoarele citosolice și veziculare conțin diverse proteine ce leagă calciul, care pot avea importanță deosebită în simpla tamponare sau chiar modularea semnalelor de calciu; unele sunt specializate pentru transmiterea semnalului, ca în cazul calmodulinei.

Calciul citosolic este crescut la nivele activatoare atât prin intrarea calciului din afară, cât și prin eliberarea sa din reticulul endoplasmatic. Contracția mușchiului neted poate fi tranzitorie (fază) sau susținută (tonică). Aceasta din urmă (menținerea forței) necesită intrare de calciu; în absența calciului extracelular componenta tonică a răspunsului contractil diminuează până la dispariție.

Căile de intrare a calciului sunt canale ionice cu o mai mare sau mai mică selectivitate. Canalele de calciu pot fi clasificate după principalul mecanism de control al kineticii deschiderii, în voltaj-operate și receptor-operate. Dintre numeroasele tipuri de canale voltaj-operate descrise, două sunt prezente în miocitele netede. Acestea sunt de tip T, fără rol funcțional bine stabilit, și de tip L, esențiale pentru intrarea calciului activator în orice circumstanțe ce presupun depolarizare (fenomen care crește probabilitatea lor de deschidere) și modulate prin numeroase alte mecanisme. Canalele de tip L se deschid și ca răspuns la întinderea celulei musculare netede, ce se însoțește de o depolarizare a membranei determinată de activarea unor canale cationice neselective sensibile la întindere. Efectele multor agenți contractanți și relaxanți sunt însoțite și, în diverse măsuri, mediate de modificări de potențial membranar; depolarizare sau hiperpolarizare globală. Potențialul de acțiune nu este în general necesar pentru contracția mușchiului neted, dar sunt tipuri de miocite netede care utilizează și acest fenomen membranar ca mecanism de activare a canalelor de calciu în vederea răspunsului contractil.

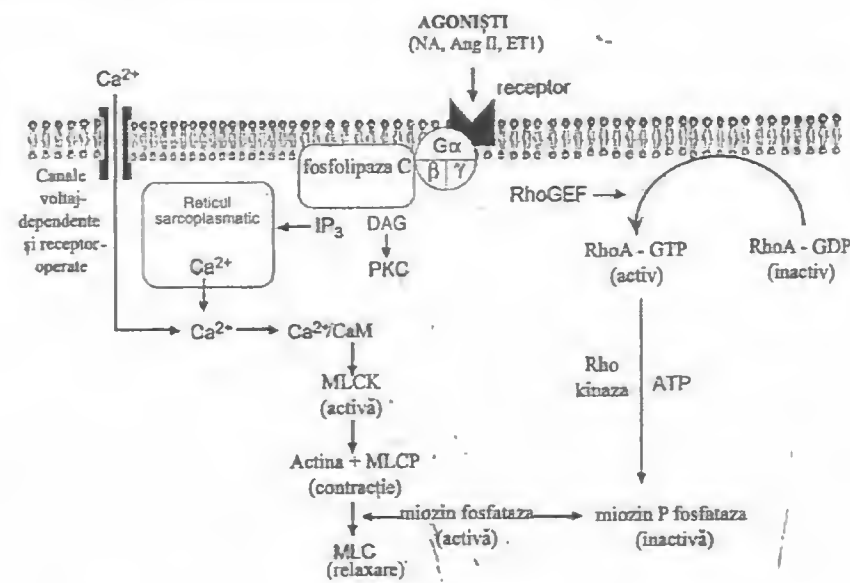


Fig. 3.29. Cuplarea excitație-contracție în mușchiul neted. NA, noradrenalina. Ang II, angiotensina II. ET1, endotelina I. IP₃, inozitol trifosfat. DAG, diacilglicerol. PKC, protein kinaza C. RhoGEF, factori de schimb nucleotidic pentru proteinele Rho. CaM, calmodulina. MLC, lanțul ușor al miozinei. MLCP, MLC fosforilat. MLCK, kinaza lanțului ușor al miozinei.

Unii agenți endogeni contractanți activează canale de calciu operate de receptori membranari. Acestea pot fi cuplate cu receptorii direct, prin proteine G sau prin mesageri secunzi și fosforilări proteice. Datele acumulate până în prezent arată că în miocitul neted, în afară de canalele de tip L, există doar două modalități de intrare a calciului influențate de activarea receptorilor membranari: canalele cationice neselective cuplate direct cu receptorii și canalele de calciu activate de eliberarea din reticul. Deci, o altă cale pentru influxul calciului, ce poate fi legată de activarea receptorilor membranari cuplați cu proteine G, este influxul capacitiv. Acesta se produce în condiții de scădere a rezervelor reticulare de calciu și este mediat de canale membranare speciale, numite canale operate de rezerve, activate sub acțiunea unui factor de influx al calciului eliberat din reticul sau prin simplă cuplare conformațională cu receptori pentru inozitol trifosfat (IP₃) în stare activată.

Eliberarea de calciu din reticulul endoplasmatic este dependentă de calciul citosolic (eliberare de calciu indusă de calciu), ca în mușchiul striat, dar predominant prin alt tip de canale reticulare, cu o importantă participare a IP₃. Mulți agenți contractanți determină activarea fosfolipazei C (PLC), mediată pe calea receptor – proteină G. PLC hidrolizează fosfatidilinozitol bifosfatul (PIP₂) plasmalemal, rezultând IP₃ și diacilglicerol (DAG). IP₃ determină eliberarea de calciu din reticul (vezi fig. 3.29), prin acțiune asupra receptorilor pentru IP₃, care sunt și canale de calciu. DAG activează protein kinaza C (PKC), calciu-fosfolipid-dependentă. În cele mai multe cazuri, PKC are efecte de favorizare a contracției, prin fosforilarea canalelor de tip L sau a unor proteine care reglează ciclarea punților acto-miozine.

3.6.3.3. Cuplarea excitație-contrație și mecanismul molecular al contracției

Interacțiunea actină-miozină este activată de creșterea calciului citosolic printr-un mecanism dependent de filamentele groase. Miozina din mușchii netezi are afinitate mică pentru actină în repaus, deci nu este necesară inhibiția interacțiunii lor, contrar prezenței și acțiunii inhibitorii a complexului troponină-tropomiozină în mușchiul striat. Mai mult, miozina trebuie activată pentru a interacționa cu actina; lanțurile ușoare reglatoare sunt fosforilate de o kinază specifică (*myosin light chain kinase*; *MLCK*), care este activată de complexul calciu-calmodulină (vezi fig. 3.29). Interacțiunea actină-miozină constă în ciclarea punților transversale, ce duce la alunecarea reciprocă a filamentelor, ca în mușchiul striat, dar cu multiple diferențe. Filamentele de actină și miozină nu au dispunere sarcomerică. În locul membranei Z, filamentele de actină se leagă de structuri speciale numite corpi denși. Con tracția este susținută atâta timp cât prezența stimulului menține intrarea calciului, dar aceasta este însoțită de valori scăzute (apropiate de cele bazale, dar mai mici decât cele necesare pentru dezvoltarea forței) pentru: calciul citosolic, activitatea MLCK și fosforilarea MLC, ciclarea punților transversale. Con tracția este susținută în asemenea circumstanțe prin punțile stabile actină-miozină, ce rezultă din caracteristicile kinetice ale ciclului de reacție (detășarea lentă a punților în care lanțul ușor este defosforilat). În unele miocite netede, fosforilarea lanțului ușor al miozinei este menținută la un anumit nivel chiar în absența unor stimuli externi, rezultând un tonus muscular bazal intrinsec.

3.6.3.4. Mecanismele relaxării miocitelor netede

În contrast cu mușchiul striat, unde relaxarea este doar rezultatul repolarizării, în mușchiul neted aceasta se produce și ca proces activ. Relaxarea determinată de simpla încetare (diminuare) a acțiunii stimulului contractil este rezultatul scăderii calciului citosolic spre valorile de repaus, în condițiile stopării (reducerii) afluxului și activității crescute a mecanismelor de extruzie menționate (acestea fiind dependente de concentrația calciului pe fața citosolică a membranelor). Îndepărtarea Ca^{2+} din citosol și stimularea fosfatazei miozinice inițiază și favorizează procesul de relaxare a mușchiului neted.

Agenții relaxanți utilizează multiple mecanisme pentru scăderea calciului citosolic, prin inhibarea mecanismelor de influx/eliberare sau prin activarea suplimentară a mecanismelor de extruzie. În aceste direcții, sunt folosite mai ales două căi: activarea canalelor de potasiu și creșterea concentrației de nucleotide ciclice. Efluxul de potasiu determină hiperpolarizare, cu inhibarea Ca_v . Nucleotidele ciclice activează kinazele corespunzătoare, cu multiple efecte ce favorizează relaxarea PKA, activează pompa de calciu plasmalemală și reduc intrarea de calciu și sensibilitatea la calciu la nivelul miofilamentelor. Aici acționează și PKG, care stimulează MLCP și contracarează inhibiția GTP-dependență a acesteia, mediind acțiunea cGMP, dar și a cAMP. PKG pare să determine relaxare mai ales prin activarea pompei de calciu reticulare, dar numeroase alte mecanisme au fost implicate: inhibarea canalelor de tip L direct și prin hiperpolarizare data de activarea canalelor de potasiu dependente de calciu, inhibarea ROC, stimularea antiportului Na/Ca, activarea pompei de sodiu (Na^+, K^+ -ATPaza), inhibarea formării și acțiunii IP₃.

3.6.3.5. Sensibilitatea interacțiunii actină-miozină față de calciul citosolic

Opus față de mușchiul scheletic și mai mult decât în miocard, agenții contractanți și relaxanți utilizează și mecanisme sensibilizante, respectiv desensibilizante ale aparatului contractil față de calciu. Deși există numeroase mecanisme ce modifică sensibilitatea aparatului contractil față de calciu, factorul principal de care depinde statusul contractil al miocitelor netede rămâne concentrația calciului în imediata vecinătate a miofilamentelor. Sensibilizarea la calciu a proteinelor contractile este semnalizată mai ales pe calea RhoA/Rho-kinaza (vezi fig. 3.29), prin inhibarea defosforilării lanțului ușor de către fosfataza lanțului ușor al miozinei (MLCP). În afară de activarea calciu-calmodulin-dependență a MLCK, fosforilarea MLC este reglată de această MLCP.

Când este fosforilată subunitatea MLCP de legare a miozinei, se inhibă activitatea enzimatică a MLCP, permițând lanțului ușor al miozinei să rămână fosforilat, fapt ce favorizează contracția, având și

efect calciu-sensibilizant. MLCP, controlată de PKC, exercită un efect moderator al contracției și accelerează relaxarea.

RhoA este o proteină G citosolică monomerică, ce activează Rho-kinaza, o serin-treonin kinază care fosforilează subunitatea de legare a MLCP, inhibând activitatea acesteia. RhoA poate fi activată în urma acțiunii unor semnale extracelulare pe receptori membranari, cu intervenția factorilor de schimb GTP/GDP, care facilitează activarea RhoA și, astfel, reglează durata și intensitatea semnalizării prin proteina G cuplată cu receptorul. Activarea RhoA poate duce la inhibarea MLCP și, în mod separat, de Rho-kinază. În plus, activitatea MLCP este stimulată de telokină (o proteină de 16 kDa) și este inhibată de PKC. Există numeroase alte mecanisme de influențare a sensibilității interacțiunii actinei față de nivelul calciului citosolic în miocitul neted. De exemplu, calciu-calmodulin kinaza II (CaMKII) favorizează relaxarea mușchiului neted prin efect calciu-desensibilizant la nivelul MLCK. În afară de mecanismul contractil principal (miozin-dependenț) descris mai sus, în contracția mușchiului neted intervin la nivelul miofilamentelor numeroase alte căi biochimice accesorii și/sau reglatoare, din care unele sunt actin-dependente, cu implicarea unor proteine specializate ce leagă actina, cum sunt caldesmonul și calponina.

4. SISTEME DE REGLARE ȘI CONTROL LA NIVEL CELULAR

Cele aproximativ 100 trilioane de celule ale corpului uman, cu structură și funcții înalt diferențiate, sunt supuse unui permanent reglaj și control cibernetic, începând cu sistemul de reglare și control genetic de la nivel intracelular și sfârșind cu autoreglarea marilor funcții ale organismului. Corpul uman dispune de câteva mii de asemenea sisteme de reglare și control, asigurând structura funcțională normală a diverselor țesuturi și organe, constanța mediului intern și adaptarea funcțiilor somato-vegetative în condițiile variabile impuse de mediul extern. Conceptul constanței mediului intern, elaborat de Cl. Bernard (1852) și confirmat de progresele ulterioare ale fiziologiei, a fost dezvoltat de Cannon sub denumirea de homeostazie (1939).

Prin homeostazie se înțelege starea de echilibru dinamic a constituenților mediului lichidian intern, indispensabilă supraviețuirii și funcționării normale a celulelor corpului uman. Prezența mediului intern în afara celulelor, dar în interiorul organismului, asigură, prin intermediul plasmăi sanguine și a lichidului interstițial, schimburile dintre mediul extern și celule.

Principalele aparate și sisteme, întregindu-și funcțiile, asigură schimburile normale dintre factorii variabili ai mediului extern și intern constant.

Sistemul digestiv, de exemplu, degradează și transformă nutrienții necesare întregului organism din mediul extern în plasmă, aparatul respirator deplasează și fixează O_2 din aerul atmosferic pe hematiile plasmatică, iar sistemul circulator distribuie nutrienții și O_2 în întregul organism prin intermediul vaselor și al plasmăi interstițiale. La rândul lor, produșii toxici rezultați din reacțiile celulare degradative sunt preluați și transportați de plasmă la organele specializate în eliminarea acestora din mediul intern în cel extern. În timp ce plămânii îndepărtează CO_2 din sânge, rinichii elimină substanțele toxice sau inutile pe cale urinară. Astfel, celulele preiau nutrienții necesari în scop energetic, plastic sau funcțional și elimină substanțele toxice sau nefolositoare, utilizând plasma sanguină și lichidul interstițial ca punți comune de comunicare cu celulele beneficiare. Celulele corpului uman putând trăi și funcționa numai în prezența lichidului extracelular, stabilitatea mediului intern (compoziția chimică, starea fizică, constantele fizico-chimice etc.) este esențială pentru supraviețuirea fiecărei celule, așa cum fiecare celulă, prin activitatea ei specializată, contribuie la menținerea mediului intern indispensabil tuturor celulelor.

Astfel, celulele, ca principală componentă a sistemului corporal organizat, beneficiază și totodată contribuie la realizarea și menținerea echilibrelor homeostazice asigurate de întreaga masă celulară. Interdependența existentă între celule, sistemele organice corporale și homeostazice este ilustrată în fig. 4.1.

Printre factorii mediului intern care trebuie menținuți în limite constante figurează concentrația moleculară a nutrienților, O_2 și CO_2 , valoarea pH-ului, concentrația apei, sărurilor și a diverșilor lor electroliți, precum și a produșilor finali de degradare, temperatura, volumul și presiunea sanguină.

Un număr de cel puțin 11 sisteme corporale contribuie la realizarea și menținerea echilibrelor homeostazice. În timp ce aparatul cardio-vascular este sistem de transport, aparatul digestiv preia și degradează alimentele în molecule mici ce pot fi absorbite și distribuite pe cale sanguină întregului organism. La rândul său, aparatul respirator deplasează O_2 atmosferic la nivelul teritoriului de schimb gazos alveolo-pulmonar și elimină CO_2 în mediul extern. Sistemul urinar îndepărtează excesul de apă și produșii toxici din plasmă, în timp ce glandele endocrine contribuie la reglarea hormonală a mediului intern.

Sistemul nervos fiind principalul sistem de autoreglare și control, participă la detectarea, inițierea și declanșarea reacțiilor de apărare, corectare sau adaptare la variațiile mediului înconjurător. Aparatul tegumentar servește ca barieră protectoare antimicrobiană și termoreglatoare, iar sistemul imun intervine

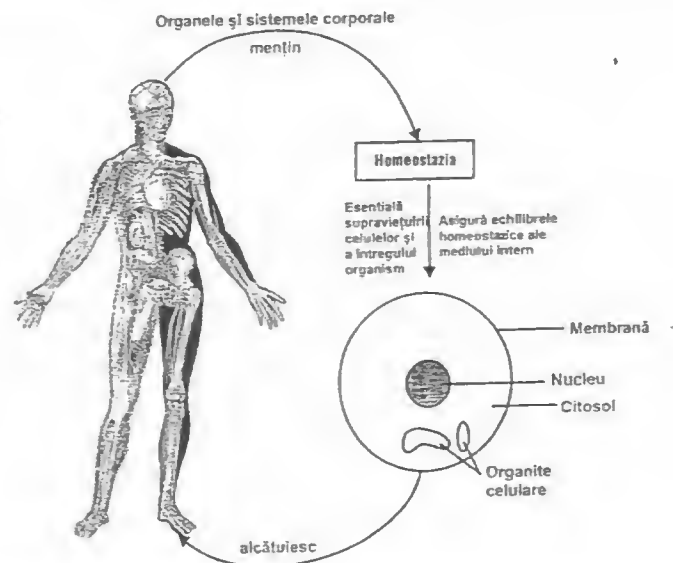


Fig. 4.1. Relațiile interdependente dintre celulele, organele și sistemele corporale și homeostazia.

contra agresiunilor celulare de origine microbiană, virală sau alergică. Între aceste aparate și sisteme există o complexă interdependență și cooperare care asigură reacții compensatoare adecvate și comportamentul organismului ca un tot unitar.

4.1. TIPURI DE REGLARE ȘI CONTROL

Sistemele de autoreglare și control necesare întreținerii echilibrului homeostazic sunt de două feluri: sisteme de control intrinsec și sisteme locale extrinseci.

În cazul controlului local intrinsec, răspunsul este limitat la organul în care apare. Ca exemplu poate fi dat cazul mușchiului striat în stare de activitate. Creșterea consumului de O_2 generator de energie contractilă și CO_2 este urmată de dilatarea vaselor musculare însoțită de creșterea fluxului sanguin local și a aportului de O_2 . Astfel, controlul intrinsec realizat de cuplul O_2 - CO_2 contribuie la menținerea nivelului optim al gazelor sanguine în mediul lichidian intern.

Sistemele de control extrinsec, reprezentate de componentele nervoase și endocrine locale, permit reglarea coordonată a mai multor țesuturi sau organe în vederea realizării unui scop comun (de exemplu, efectele nervoase simultane pe cord și vase).

Cei mai mulți factori ai mediului intern sunt menținuți în limite constante prin controale extrinseci produse în afara organului afectat, cu participarea mai multor teritorii efectoare. Tipic este cazul acțiunii simultane a sistemului nervos asupra cordului și vaselor pentru a restabili presiunea arterială când aceasta scade sub valoarea normală.

Mecanismele homeostazice de autoreglare și menținere în anumite limite a compoziției mediului intern pot fi de natură fizico-chimică, enzimatică, hormonală sau nervoasă. Ca exemple pot fi date: echilibrul acido-bazic, realizat prin mecanisme fizico-chimice, raportul echilibrat între factorii enzimatici coagulanți și fibrinolitici, care asigură încoagulabilitatea sângelui circulant, sau reglarea neurohormonală a concentrației glucozei, aminoacizilor, lipidelor și ionilor în spațiile intra- și extracelulare. Celulele trăiesc, cresc și-și îndeplinesc funcțiile specifice numai în prezența unor cantități adecvate ale acestora și, la rândul lor, participă la menținerea echilibrului homeostazic. Unele sisteme de control operează la nivelul unui sau mai multor organe efectoare pentru a asigura o anumită funcție, în timp ce altele acționează asupra întregului organism, controlând și reglând relațiile dintre organe. Rinichii, de exemplu, reglează concentrația ionilor de hidrogen, sodiu, potasiu, fosfat, bicarbonat și a altor constituenți ai lichidelor extracelulare. Sistemul respirator, din contră, operând în asociere cu sistemul nervos și aparatul circulator, asigură schimburile gazoase dintre organism și mediul înconjurător.

Homeostazia oxigenului este asigurată de concentrația acestuia în sânge, dependentă, la rândul său, atât de conținutul de eritropoietină, formatoare de hemoglobină ca sistem transportor de oxigen la țesuturi, cât și de concentrația în bioxid de carbon, ca stimulent al centrilor respiratori. În cazul aparatului circulator, autoreglarea este sub controlul predominant al zonelor reflexogene de la nivelul bifurcației carotidelor și arcului aortic, bogate în baroreceptori sensibili la distensie și variație de presiune. Excitantul fiziologic este presiunea cu care sângele circulă la nivelul zonelor respective, influențând prin intermediul nervilor depresori tonusul centrilor vasomotori (fig. 4.2).

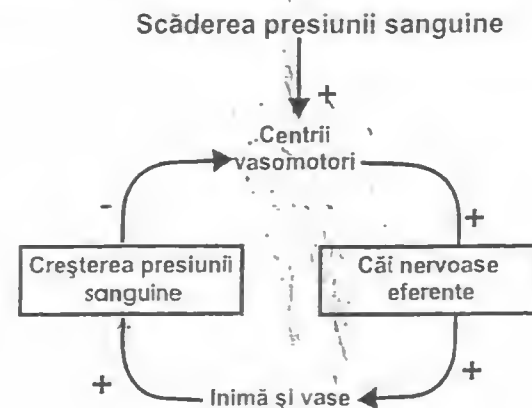


Fig. 4.2. Reglarea reflexă a presiunii sanguine.

Fenomene neuroreflexe inverse se produc în cazul creșterii presiunii sanguine peste valorile normale.

4.1.1. CONTROLUL GENETIC ȘI BIOCHIMIC CELULAR

La nivelul celular există două principale modalități de reglare și control. Una dintre acestea este reglarea genetică, prin care activitatea genelor este controlată de propria lor activitate. Controlul funcției genetice se realizează fie prin reprimarea sau activarea unor gene structurale de către proteina represoare sau activatoare sintetizată la nivelul operonului în vederea diferențierii celulare, fie prin reglarea sintezei de diferite substanțe chimice intracelulare, în funcție de necesitățile plastice sau funcționale ale celulei respective. Detaliile acestor două modalități de reglare și control genetic constituie obiectul cercetărilor de

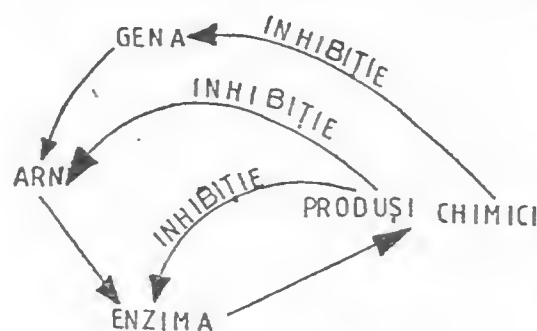


Fig. 4.3. Inhibarea activității enzimatică de către produși chimici de reacție.

substanțe formate cu ajutorul enzimelor respective. Aproape totdeauna produsul sintetizat acționează în sens inhibitor asupra primei enzime participante la procesul de biosinteză (fig. 4.3).

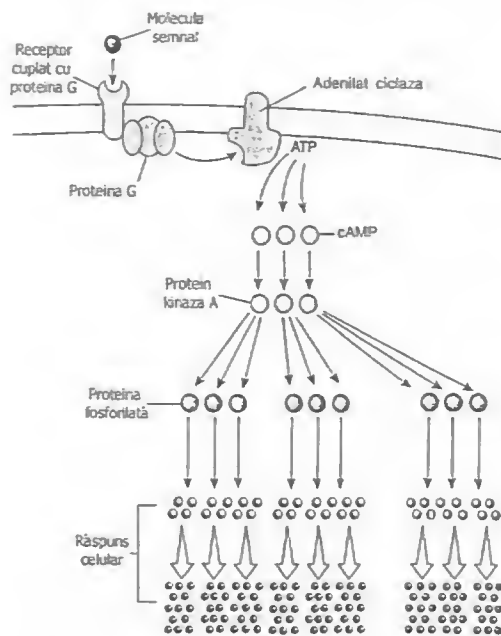


Fig. 4.4. Sistemul adenilat ciclază-cAMP cuplat cu proteinele G.

mare actualitate din domeniul geneticii moleculare. Ca exemplu, poate fi dată activarea enzimelor implicate în sinteza purinelor și pirimidinelor din structura acizilor nucleici. Bazele purinice și pirimidinice fiind necesare în cantități aproximativ egale la formarea de ADN și ARN, excesul de purine inhibă enzimele care participă la biosinteza de noi purine și activează sinteza de pirimidine. Efecte inverse au loc în prezența pirimidinelor în exces. În felul acesta, se realizează o stimulare reciprocă și continuă între cele două substanțe indispensabile biosintezei de acizi nucleici.

La rândul său, inhibarea enzimatică se produce sub influența excesului de

substanțe emise de ADN, ca sistem de comandă și control, asigură reglarea optimă a mărimii comandate, respectiv a sintezei de proteine. Sub influența radiațiilor ionizante, a substanțelor cancerigene, virusurilor, iritantelor etc. pot apărea mutații ale unor gene celulare, care, pierzându-și capacitatea de reglare și control cibernetic, devin gene oncogene.

Cea de-a doua modalitate de autoreglare și control celular este reprezentată de *reglarea activității enzimatică*. Aceasta se poate realiza în sens activator sau inhibitor (fig. 4.4).

Activarea enzimatică se exercită asupra enzimelor inactive sau inactivate de către unele substanțe inhibitoare. Ca exemplu poate fi dată acțiunea stimulantă a cAMP asupra sistemului enzimatic glicogenolitic, în vederea eliberării glucozei și formării de ATP. Când ATP scade în celulă, conținutul în cAMP crește, determinând activarea fosforilazei și depolimerizarea glicogenului, urmată de eliberarea și degradarea glucozei însoțită de refacerea ATP. Acționând asupra receptorilor specifici, canalelor ionice sau proteinei G membranare, molecula semnal activează sau inhibă cuplul adenilat ciclază-cAMP guanilat ciclază-cGMP, determinând amplificarea

sau inhibarea răspunsului celular. Consecințele metabolice ale cuplării sistemului adenilat ciclază-cAMP cu ale proteinei G sunt ilustrate în figura 4.4.

În general, reglarea enzimatică monitorizează compoziția chimică a celulei și face corecțiile necesare în funcție de necesități. La mecanismele de control intracelular se poate adăuga activarea sau inhibarea acestora de către hormoni locali sau generali, implicați în creștere, reproducere etc.

4.1.2. CARACTERISTICILE SISTEMELOR DE CONTROL BIOLOGIC

Majoritatea sistemelor de control acționează prin reacții corectoare de sens negativ sau pozitiv în vederea restabilirii și menținerii echilibrului homeostazic. Asemenea reacții sunt posibile întrucât sistemele de reglare și control biologic sunt constituite, ca și cele tehnice cu reglaj automat, din elemente componente conectate în interacțiune, care asigură controlul intrării informațiilor specifice (chimice, mecanice, electrice etc.) de către ieșirea variabilă și care, ca efect al controlului, tinde să devină constantă. În limbaj cibernetic, acestea sunt denumite sisteme buclate de comandă și control în circuit închis cu acțiune inversă (*feed-back*), pozitivă sau negativă, formate din mărimea comandată (sistem controlat), centrul de comandă (sistem de control) și conexiunea inversă (afereție inversă) ce asigură retroacțiunea și corectarea răspunsului. În condițiile organismului întreg, orice deviere în plus sau în minus pune în stare de funcțiune unul sau mai multe sisteme de autoreglare și control, în vederea restabilirii echilibrului și revenirii la normal prin reacții de *feed-back* negativ. Prin astfel de mecanisme se realizează autoreglarea tuturor funcțiilor: somato-vegetative ale organismului, așa cum se va vedea în capitolele următoare.

Reglarea secreției adenohipofizare

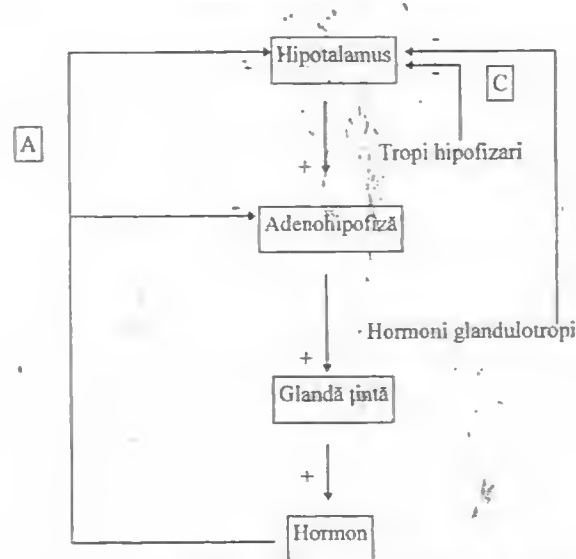


Fig. 4.5. Cele trei nivele ale reglării adenohipofizare prin mecanisme de *feed-back* negativ. A, buclă lungă. B, buclă scurtă. C, buclă ultrascurtă.

Mecanismele de control homeostatic ale organismului operează în majoritatea cazurilor pe principii de *feed-back* negativ. Acestea apar când o anumită variație determină un răspuns care se opune schimbării, determinând o reacție inversă, în vederea îndepărtării dezechilibrului creat. Clasic este controlul prin *feed-back* negativ al presiunii sanguine (vezi fig. 4.2) sau al reglării secreției adenohipofizare. În cazul secreției hipofizare, autoreglarea se produce la 3 nivele, prin mecanisme de *feed-back* negativ lung, scurt și ultracurt (fig. 4.5).

Prin mecanisme cibernetice similare de *feed-back* negativ se realizează autoreglarea principalelor funcții somato-vegetative și neuroendocrine.

Când reacțiile inverse duc la agravarea dezechilibrului creat de factorul perturbator, suntem în prezența reacțiilor de *feed-back* pozitiv.

Feed-back-ul pozitiv, deși apare mai puțin frecvent, randamentul său fiind în creștere face ca variabila controlată să se dezvolte în aceeași direcție. În loc să determine un răspuns care să contracareze devierea inițială, *feed-back*-ul pozitiv potențează răspunsul activat.

La nivel celular, reacțiile de *feed-back* pozitiv contribuie la creșterea pragului de excitație a membranei celulare. Odată cu atingerea pragului de excitație și producerea fenomenului de depolarizare membranară are loc deschiderea canalelor ionice voltaj-dependente de Na^+ , care cresc exploziv permeabilitatea și influxul sodiului în celulă, urmat de efluxul potasic, intensificând în continuare depolarizarea generatoare de răspuns celular activat (fig. 4.6).



Fig. 4.6. Reacție de *feed-back* pozitiv produsă de atingerea pragului de excitație a membranei celulare.

Fenomelele potențatoare ale răspunsului inițial duc adeseori la agravarea dezechilibrelor create de factorul perturbator, favorizând instalarea unui cerc vicios producător de stări patologice. Există însă și efecte benefice din punct de vedere fiziologic, realizate prin *feed-back* pozitiv. În timpul nașterii, de exemplu, oxitocina, determinând contracții ritmice uterine, realizează distensia progresivă a cervicului,

declanșatoare în continuarea a eliberării acesteia, indispensabilă contracțiilor de intensitate crescândă din timpul travaliului. *Feed-back*-ul pozitiv respectiv încetează odată cu expulzia fătului (fig. 4.7).

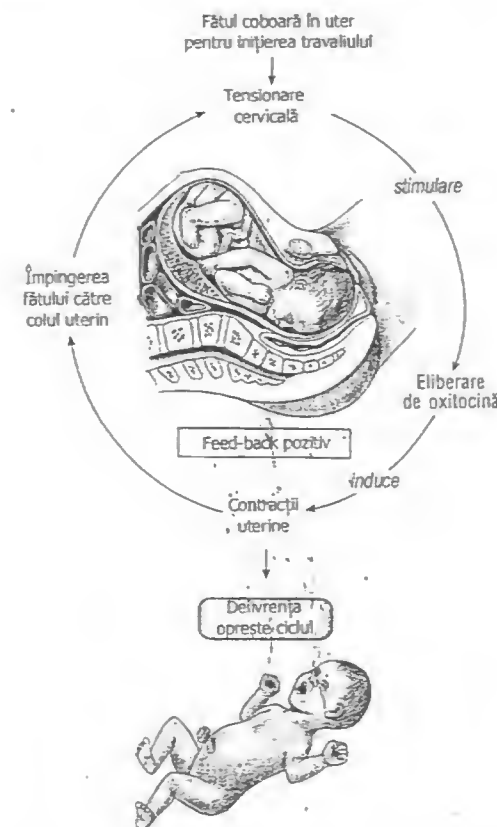


Fig. 4.7. Buclă de *feed-back* pozitiv din timpul travaliului și expulziei fătului.

În afara acestor două modalități de autoreglare a diverselor variabile reglate, există și un al treilea mecanism de *feed-back*, mai puțin utilizat de organismul uman. Este mecanismul anticipativ de reglare (de tip *feed-forward*), care constă în răspunsul anticipat la schimbarea variabilei reglate. Ca exemplu poate fi menționată creșterea secreției de hormoni gastro-intestinali, chiar din momentul pătrunderii alimentelor în tubul digestiv, în vederea intensificării proceselor de captare și stocare a nutrienților ingerate după ce au fost absorbite din tractul gastro-intestinal. Printr-un mecanism de *feed-forward* similar, creierul controlează și corectează anticipând eficiența contracțiilor musculaturii striate în vederea adaptării tonusului muscular bazal la necesitățile variabile ale motricității.

5. MEDIUL INTERN

Mediul intern este mediul lichidian în care se desfășoară procesele fizico-chimice și biologice celulare caracteristice materiei vii. Folosit inițial de Cl. Bernard (1856) pentru a sublinia importanța sângelui și plasmei interstițiale ca principalele punți de legătură între celule și mediul extern, termenul a fost extins ulterior la toate umorile organismului (limfă, LCR, umoare apoasă, lichidele seroaselor (peritoneală, pleurală și pericardică, sinoviale etc.)). În felul acesta, noțiunea de mediu intern cuprinde în prezent totalitatea lichidelor care asigură transportul de gaze și substanțe nutritive, consumul lor și depurarea celor aproximativ 100 trilioane de celule ale organismului uman de producții toxice rezultate din combustiiile tisulare.

Constanța mediului intern, intuită de Cl. Bernard (1858) ca una din condițiile obligatorii ale normalității, poartă numele de homeostazie (Cannon, 1932). Diversele țesuturi și organe nu numai că beneficiază, ci și participă la realizarea și menținerea echilibrului homeostazic. Astfel, în timp ce tubul digestiv asigură aportul de principii alimentare iar plămânii satisfac necesitățile variabile de oxigen, rinichii mențin constantă concentrația electroliților din celule și umori, cu participarea obligatorie a sistemului circulator ca punte de legătură între organele de absorbție și excreție, pe de o parte, și țesuturile beneficiare, pe de alta. Maniera prin care principalele organe și sisteme realizează constanța mediului intern va fi discutată în capitolele respective de fiziologie.

Componenta dominantă atât a materiei vii, cât și a tuturor umorilor fiind apa, într-un prim moment vor fi expuse sumar datele elementare privind distribuția și rolul ei în organism.

5.1. APA ÎN ORGANISM

Ca principală componentă a materiei vii și a umorilor organismului, apa îndeplinește o serie de funcții complexe. Fiind un constituent indispensabil al materiei vii, ea face oficiul de solvent al substanțelor organice și anorganice. Apa este pivotul majorității proceselor de absorbție și excreție și reprezintă, în același timp, mediul în care se desfășoară procesele de biosinteză și biodegradare caracteristice organismelor vii. Prin calitățile sale fizice (caldura specifică și de evaporare mare), ea asigură desfășurarea normală a mecanismelor homeostazice, făcând posibilă supraviețuirea organismului într-un mediu continuu variabil și adesea agresiv. Detalierea acestor funcții va fi reluată în cadrul capitolelor ulterioare.

5.1.1. REPARTIȚIA APEI ÎN ORGANISM

Conținutul în apă al organismului uman adult variază între 56-60%, ceea ce reprezintă 40-42 de litri pentru un subiect de 70 kg. Acest volum se repartizează în două mari sectoare: *intracelular* și *extracelular* (fig. 5.1).

Apa intracelulară intră sub formă legată în constituția diferitelor structuri celulare și îndeplinește, sub formă liberă, rolul de mediu de dispersie în citoplasmă; reprezintă aproximativ 40% din greutatea corporală (28 de litri la un adult de 70 kg).

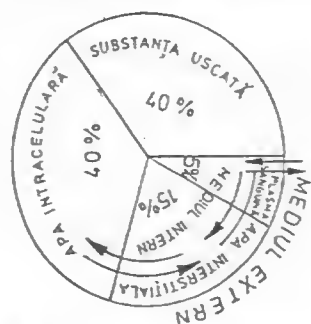


Fig. 5.1. Repartiție procentuală a apei în organism.

Apa extracelulară, repartizată în compartimentele descrise mai sus sub genericul de mediu intern, reprezintă aproximativ 20% din greutatea organismului (14 litri la un adult de 70 kg). Acest volum de apă ocupă atât spațiul intercelular (interstițial), cât și spațiul intravascular.

Apa din spațiul interstițial reprezintă constituentul de bază al plasmiei interstițiale, mediul cu care coloniile celulare se află în contact direct și fără de care viața și reactivitatea celulară nu sunt posibile; reprezintă 16% din greutatea corporală (11–12 litri la un adult de 70 kg). Spațiul interstițial, reprezentând o importantă componentă a mediului extracelular, poate fi considerat un adevărat organ de translocare în care concentrația constantă a unei substanțe este dată de raportul dintre intrarea și eliminarea (clearance-ul) substanței în cauză.

Spațiul interstițial este format din trei faze:

a) faza fluidă, reprezentată de apă și substanțele micromoleculare adesea disociate;

b) faza macromoleculelor fluide, reprezentată mai ales de proteine serice a căror concentrație reprezintă aproximativ 30–80% din concentrația lor plasmatică și care, datorită impermeabilității lor prin membrana capilară, determină presiunea oncotică (coloidosmotică) caracteristică spațiului interstițial (4.5 mm coloană Hg);

c) matricea spațiului interstițial este formată din lanțuri lungi protidice și polizaharidice de diferite forme, dimensiuni și tipuri (de exemplu, acidul hialuronic).

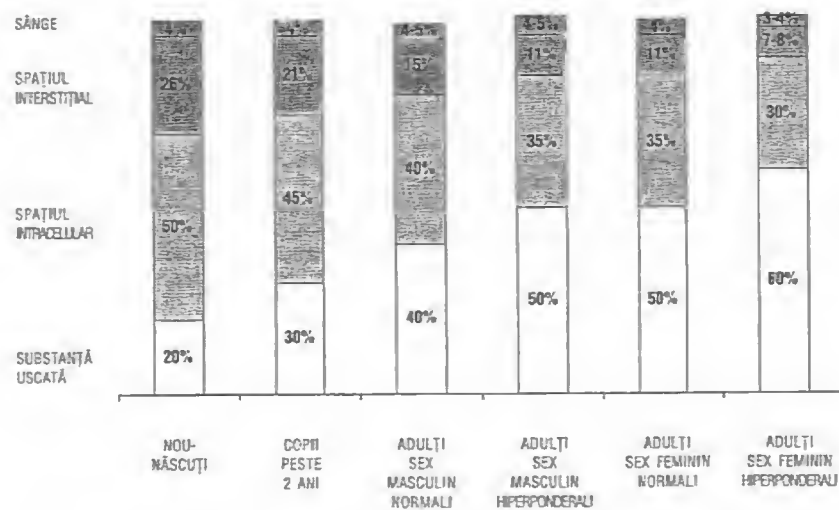


Fig. 5.2. Repartiție procentuală a apei în organism în funcție de vârstă, sex și conținut apos.

Apa extracelulară repartizată în compartimentul intravascular formează plasma sanguină. Reprezintă aproximativ 4% din greutatea corpului (cca 2.8 litri la un adult de 70 kg). Prin circulația sa, constituie sistemul esențial de legătură dintre mediul intern și cel extern. Tot în compartimentul extracelular sunt incluse lichidele zise transcelulare. Aceste lichide sunt localizate în seroase, sinoviale, umori, secreții și reprezintă sub 1% din greutatea corpului (cca 0.5 litri la adultul de 70 kg).

Conținutul în apă al organismului este departe de a fi uniform repartizat. El depinde de sex, vârstă, starea de nutriție a organismului, organul, țesutul sau sistemul luat în considerație. La sexul feminin conținutul în apă este mai redus (55%) decât la bărbați (60%). Cantitatea de apă scade odată cu înaintarea în vârstă (fig. 5.2).

Obezitatea, prin excesul de țesut gras hidrofob, se însoțește de o reducere a proporției de apă. Cea mai mare proporție de apă se află la nivelul plasmiei sanguine (90%), în timp ce țesutul adipos conține doar 20%, iar smalțul dentar doar 0.2% (fig. 5.3).

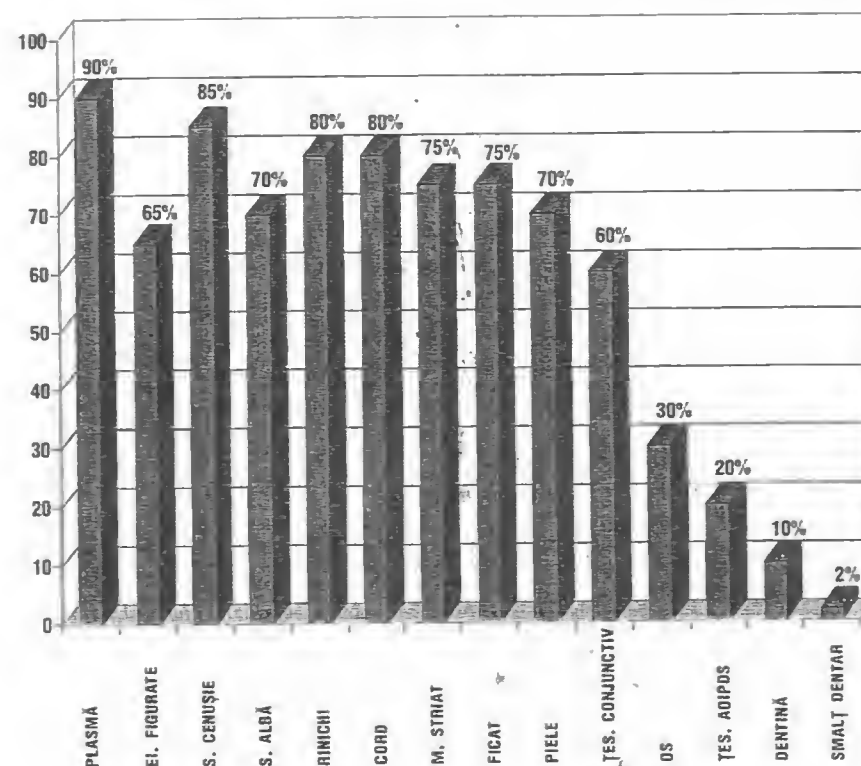


Fig. 5.3. Conținutul procentual de apă în diverse organe și țesuturi.

Musculatura scheletică conține aproximativ 1/2 din cantitatea totală de apă din organism, pielea aproximativ 1/5, iar sângele doar 1/10.

5.1.2. DEPLASAREA APEI ÎN ORGANISM

În calitate de component fluid principal al organismului, apa se află într-o continuă deplasare, antrenând odată cu ea micro- sau macromoleculele necesare activității organismului sau rezultând din aceasta. Deplasarea apei, dintr-un compartiment în altul al mediului intern, realizează unitatea umorală a organismului. Această deplasare presupune depășirea unor bariere de permeabilitate, reprezentate de membranele celulare și epiteliale ce delimitează compartimentele menționate. Mișcarea apei prin aceste bariere este guvernată, în majoritatea cazurilor, de legile hidrodinamicii. Presiunile hidrostatică, osmotică și coloidosmotică, dictate de conținutul în electroliți și substanțe macromoleculare sunt factori ce determină sensul deplasării apei între diversele compartimente ale organismului. Este de subliniat faptul că mobilitatea apei variază în funcție de bariera ce trebuie traversată. Dacă deplasările la nivel de perete capilar, între plasma sanguină și cea interstițială, se desfășoară nestânjenit, membranele celulare conferă un oarecare grad de autonomie compartimentului intracelular.

Detalierea mecanismelor ce determină deplasarea apei între compartimentele mediului intern se va realiza în capitolele de fiziologie a sângelui, a circulației și a excreției renale.

5.1.3. ECHILIBRUL HIDRIC AL ORGANISMULUI

Constanța volumului de apă din organism rezultă din echilibrul ce se realizează între aportul și eliminarea de apă (tabelul 5.1).

TABELUL 5.1

Aportul și eliminarea de apă în 24 h

Aport de apă	ml/24 h	Eliminare de apă	ml/24 h
Apă și alte lichide	500-1 500	Urină	600-1 600
Apă din alimente	800-1 000	Evaporare (plămâni, transpirație, perspirație)	850-1 200
Apă endogenă (din oxidări)	200-400	Materii fecale	50-200
Total	1 500-2 900	Total	1 500-3 000

Aportul de apă, realizat mai cu seamă din surse exogene, este controlat prin senzația de sete. Eliminarea de apă pe calea evaporării, dar mai ales prin urină, este controlată prin mecanismele filtrării glomerulare și sistemele neuro-umorale de reglare a reabsorbției tubulare, ce vor fi detaliate în cadrul fiziologiei aparatului excretor.

Reduceri minime ale conținutului hidric (sub 1%) declanșează setea și ingestia consecutivă de apă, diminuând simultan și eliminarea de lichide. Încălcarea cu apă a organismului acționează în sens contrar, diminuând ingestia și măbind diureza (fig. 5.4).

Ambele reacții compensatoare se produc cu participarea centrilor setei din hipotalamusul lateral, pe de o parte, și a hormonilor anti-diuretic și aldosteron, implicați în reglarea hidroelectrolitică, pe de altă parte. Eliberarea lor este determinată de variațiile osmolarității și volumelor lichidiene extra- și intracelulare induse fie de ingestia exagerată sau redusă de apă și săruri, fie de pierderile mari lichidiene prin diureză, diaree, vărsături sau transpirații.

Reacții neuro-endocrine similare pot apărea după administrare intravenoasă de soluții hiper- sau hipotone. În general, hiperosmoza provocată de pierderile mari lichidiene, de ingestia insuficientă de apă sau exagerată de sare se însoțește de uscăciunea mucoasei bucale, apariția senzației de sete și ingestia de apă, dublată de stimularea secreției de ADH, în vederea activării resorbției tubulare, care are ca principale modalități de restabilire a echilibrului hidric.

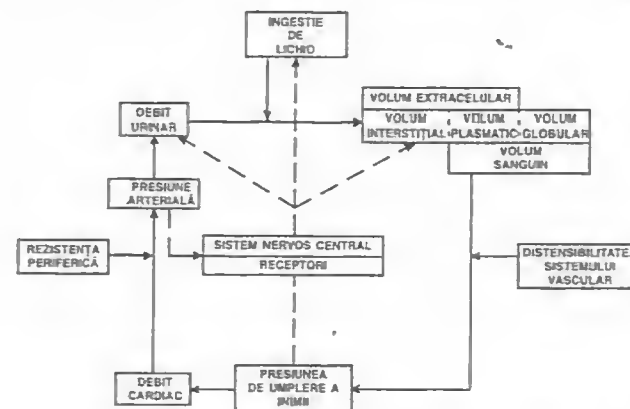


Fig. 5.4. Reglarea volumelor extracelulare și plasmatic în funcție de ingestia de lichide.

Scăderea presiunii osmotice determinată de ingestia crescută de lichide sau insuficiență de săruri, din contră, reduce secreția de ADH, concomitent cu eliberarea crescută de aldosteron, pentru a asigura eliminarea excesului de apă și reținerea sodiului în organism.

La rândul lor, modificările volemice întregesc reacțiile neuro-endocrine provocate de hipo- sau hiperosmoza, cu descărcări compensatoare de factor natriuretic atrial și prostaglandine renale cu rol reglator asupra activității sistemului renină-angiotensină-aldosteron, la nivelul tubilor renali. Atât factorul natriuretic atrial, cât și prostaglandinele cresc excreția tubulară de sodiu și apă prin mecanisme diferite. În timp ce factorul natriuretic atrial eliberat sub influența distensiei auriculare inhibă secreția de renină și formarea de angiotensină aldosterono-eliberatoare, prostaglandinele provoacă natriureză și kaliureză prin mecanismul direct al vasodilatației de la nivelul zonei medulare renale. Efectele natriuretice astfel realizate contribuie, alături de inhibarea ingestiei de lichide și secreției de ADH și aldosteron, la excreția renală crescută de sodiu și apă din timpul hipervolemiei. Reacții inverse de scădere a secreției de factor natriuretic atrial dublate de activarea secreției de ADH și a sistemului renină-angiotensină-aldosteron se produc în caz de hipovolemie, cu răsunetul corespunzător hidroelectrolitic. În felul acesta, atât variațiile presiunii osmotice, cât și cele volemice sunt urmate de reacții neuro-endocrine compensatoare, de restabilire și menținere a echilibrului hidric în limite normale.

Echilibrul hidric reprezintă un factor decisiv în homeostazia generală a organismului. Existența unui volum constant de apă asigură izotonia (presiunea osmotică constantă de 300 mOsm/l sau 7,6 atm) și izoionia (egalitatea dintre suma sarcinilor pozitive cu cele negative, de cca 155 mEq/l cationi și, respectiv, anioni). Ambele proprietăți sunt caracteristice de bază ale mediului intern.

5.1.4. PERTURBĂRI ALE ECHILIBRULUI HIDRIC

Modificările echilibrului hidric pot îmbrăca fie forma unui bilanț negativ (deshidratate), fie cea a unui bilanț pozitiv (hiperhidratate). În funcție de compartimentul interesat, deshidratările și hiperhidratările pot fi extracelulare, celulare sau globale.

Deshidratările extracelulare sunt legate, de obicei, de pierderea sodiului plasmatic (regim alimentar cu restricție sodată, vărsături, diaree, fistule intestinale, transpirații profuze, nefroză, insuficiența corticosuprarenalei etc). Reducerea presiunii osmotice favorizează eliminarea apei din mediul extracelular.

Deshidratările predominant celulare apar în febră și în retențiile sodate (hiperaldosteronism).

Deshidratările globale apar în suprimarea ingestiei de lichide sau eliminările masive de apă (diabet insipid).

Hiperhidratările extracelulare pot fi normotone (când se rețin simultan apa și sodiul), hipotone (când este vorba de o încărcare predominant apoasă) sau hipertone (când încărcarea este predominant sodată).

Hiperhidratarea celulară este, de obicei, de tip mixt, cuplată cu o deshidratare extracelulară.

Hiperhidratarea globală are aspectul unei adevărate intoxicații cu apă.

Se descriu și tulburări mixte, cum ar fi, de exemplu, cazul retenției sodate, în care hiperhidratarea extracelulară este cuplată cu o deshidratare celulară. În deficitul sodat, deshidratarea extracelulară este însoțită frecvent de o hiperhidratare intracelulară.

5.1.5. MĂSURAREA DISTRIBUȚIEI APEI ÎN ORGANISM

Cunoașterea cantității de apă din organism, precum și a variațiilor sale în sensul hiperhidratării sau al deshidratării, reprezintă un element important de diagnostic, atitudine terapeutică și prognostic. Cântărirea zilnică sau stabilirea bilanțului hidric (ingestie/excreție) aduc informații importante cu privire la echilibrul hidric al pacientului. Date mult mai precise și, prin aceasta, mai utile aduc însă tehnicile de determinare a spațiilor hidrice din organism.

Determinarea spațiilor hidrice se realizează în principiu prin *metoda diluției*. Se injectează într-unul dintre compartimentele hidrice o cantitate de substanță (Q). După un interval de timp necesar difuziunii uniforme a substanței se determină concentrația realizată (C) în volumul dat (V). Din relația:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (1)$$

rezultă că:

$$V = \frac{Q}{C} \quad (2)$$

Substanțe. Pentru a putea fi utilizată în astfel de determinări, o substanță trebuie să îndeplinească o serie de condiții generale, și anume: să fie inocuă; să difuzeze uniform în spațiul măsurat; să fie inertă din punct de vedere metabolic; să nu aibă un echivalent endogen; să nu modifice presiunea osmotică; să nu se fixeze pe elementele figurate din sânge, pe alte celule sau pe albumine; să poată fi determinată cantitativ.

În afara acestor condiții, o substanță utilizată trebuie să rămână un timp suficient în interiorul compartimentului respectiv fără a difuza în afara sa. Datorită acestui fapt, pentru determinarea spațiului intravascular se folosesc substanțe cu moleculă mare ce nu traversează membrana capilară, în timp ce pentru determinarea spațiului extracelular trebuie folosite substanțe cu dimensiuni moleculare suficient de reduse pentru a traversa membrana capilară, dar nu și pe cea celulară. Pentru spațiul hidric total se vor utiliza substanțe micromoleculare difuzibile prin ambele membrane.

a) **Determinarea spațiului intravascular.** Spațiul intravascular total (volemia) este alcătuit din două volume distincte: volumul plasmatic (VP) și volumul globular (VG). Volumul globular (VG) reprezintă aproximativ 45% din volumul total de sânge. Acest volum procentual eritocitar, numit și hematocrit (Ht), se determină prin centrifugare. Din sângele venos, recoltat pe cristale de amestec anticoagulant de oxalați sau pe heparină, se încarcă, cu ajutorul unei pipete Pasteur, tuburile gradate Winthrop, cu lumen foarte îngust. După centrifugare standard, de 30 de minute la 3 000 r/m, repetată până în momentul în care nivelul sedimentului nu se mai modifică, se citește direct la limita inferioară a stratului cenușiu de leucocite volumul procentual al masei hematice sedimentate. Valoarea obținută se consideră a fi egală cu hematocritul, cu toate că, de fapt, stratul hematocit mai conține circa 3–8% plasmă interstițială. Hematocritul venos, astfel determinat și utilizat curent în laborator ca măsură a cantității de hematii din sânge, este în general mai

redus față de hematocritul arterial, reprezentând cam 91% din hematocritul somatic (hematocrit venos = hematocrit somatic \times 0,91).

Valorile normale ale hematocritului variază la adulți în funcție de sex ($46,5 \pm 5\%$ la bărbați și $42 \pm 5\%$ la femei). Variații fiziologice mai apar și în funcție de vârstă. Nou-născuții, cu poliglobulia caracteristică vârstei, au un hematocrit de 56%, în timp ce la vârsta copilăriei apar oscilații între 35 și 45%. Variații fiziologice în sensul creșterii se întâlnesc și în poliglobulia de altitudine. În condițiile unor stări patologice, cum ar fi anemiile, hematocritul scade, în timp ce poliglobuliile din tuberculoză sau alte boli respiratorii cronice determină creșteri ale indicatorului. Șocul, prin fenomenele de hemoconcentrație, se însoțește de creșteri ale hematocritului.

Determinarea volumului plasmatic (VP). Substanțe utilizate: coloranți (roșu de Congo, albastru Evans), albumină marcată cu ^{131}I (RISA), substanțe macromoleculare (polivinilpirolidon – PVP).

Tehnică: se injectează i.v. o cantitate cunoscută de substanță (de exemplu, albastru Evans 1–3 ml soluție 0,5% sau RISA 10–15 μC), se așteaptă 10 minute, se recoltează din altă venă 5 ml de sânge. În plasma probei se determină concentrația substanței:

$$VP = \frac{Q}{C} \quad (3)$$

Determinarea volumului globular (VG). Metode directe: se injectează izotopi hematotropi (^{55}Fe , ^{42}K , ^{51}Cr) sau un număr cunoscut de hematii marcate cu izotopi ori de hematii compatibile, dar de grup diferit. Ulterior se află diluția și se calculează ca mai sus.

Metode indirecte: prin calcul, utilizând relația:

$$VG = \frac{VP \times Ht}{100 - Ht} \quad (4)$$

Determinarea volumului total (volemia) (VT). Metode directe: suma volumelor plasmatic și globular determinate direct:

$$VT = VP + VG \quad (5)$$

Metode indirecte: se poate calcula volemia cunoscând valoarea hematocritului și a volumului plasmatic determinate direct:

$$VG = \frac{VP}{100 - Ht} \cdot 100 \quad (6)$$

b) **Determinarea spațiului extracelular.** Substanțe: tiocianat de sodiu, inulină, manitol, ^{24}Na , ^{51}Cl etc.

Tehnică: se injectează i.v. 10 ml soluție tiocianat 1N. După 60 de minute se recoltează probe de sânge și se determină concentrația.

c) **Determinarea spațiului hidric total.** Substanțe: antipirină, uree, sulfamide, apă grea sau tritiată. Tehnică: se injectează 0,1 ml/kg antipirină soluție 10%. La 2, 3 și 4 ore se recoltează probe de sânge, determinându-se concentrația.

d) **Determinarea spațiului interstițial.** Metodă indirectă: spațiul interstițial = spațiul extracelular – VP. (7)

e) **Determinarea spațiului intracelular.** Metodă indirectă: spațiul intracelular = spațiul total – spațiul extracelular.

5.2. SÂNGELE

Sângele reprezintă un țesut lichid circulant, format din elemente figurate suspendate în plasmă. Ca lichid complex circulant, sângele are, în linii mari, compoziția ilustrată în fig. 5.5. În calitate de compartiment extracelular conținând plasmă sanguină, are, în ciuda volumului său relativ redus, o deosebită importanță funcțională.

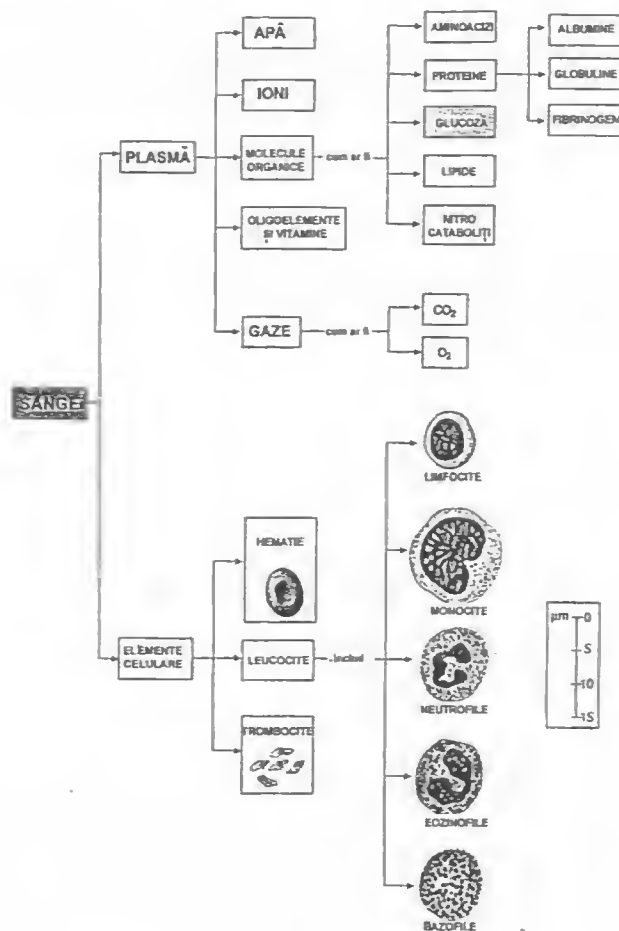


Fig. 5.5. Compoziția sângelui.

Prin cei 5,5 litri de sânge, conținut în medie de organismul adult, se realizează toate sau aproape toate schimburile cu rol nutritiv și de epurare între organism și mediul extern.

În condiții de repaus, aproape jumătate din masa sanguină totală (40–45%) se află cantonată la diverse niveluri, în viscere și plexurile subapilare, unde circulă extrem de lent, fiind momentan scoasă în afara circulației active. Este vorba de sângele numit stagnant sau de rezervă.

Volumul sanguin total, de 5–5,5 litri, reprezintă aproximativ 1/13–1/14 (6,9–7,4%) din greutatea corporală, ceea ce corespunde la 55–70 g/kg corp, sau, într-o exprimare mai riguros funcțională, la circa 2,5–3,2 litri/m² suprafață corporală (trebuințele energetice ale organismului sunt condiționate în primul rând de suprafața sa și nu de greutatea propriu-zisă). Din această cantitate, un volum de aproximativ 3,5 litri (55%) este reprezentat de plasmă, restul 1,5–2 litri fiind ocupat de elementele figurate (45% – hematocrit) (fig. 5.6).

Această apreciere volumetrică a proporției elementelor figurate din sângele total este considerată în prezent unul dintre cele mai sigure criterii de apreciere a normalității conținutului în hematii (mai sigur decât numărătoarea pe lamă).

Determinarea hematocritului și a volumului sanguin total au fost deja prezentate (vezi mai sus).

Masa sanguină variază în funcție de starea fiziologică a organismului. La bărbați, volumul sanguin este cu 10% mai mare față de femei, mai ales pe seama unui volum hematic crescut. Volemia crește în cazul efortului fizic, al temperaturii ambiante crescute, la altitudine, în cursul unor emoții puternice, în jumătatea a doua a sarcinii. Variațiile volemiei* în condiții fiziologice au loc nu numai pe seama creșterii volumului total, ci și pe seama redistribuirii sângelui între diversele sectoare. Se știe că, în mod normal, mușchiul conține cam 40% din volumul sanguin, pielea 30%, viscerele 25%, coronarele 5%. Efortul fizic determină creșteri mari ale volumului sanguin din segmentele active, cu reducerea în consecință a rezervelor din restul organismului. Se știe, de exemplu, că efortul digestiv este un factor ce influențează negativ activitatea fizică și cerebrală, prin reducerea aportului de sânge în aceste sectoare. Volemia poate crește temporar și în urma unor ingestii masive de apă și săruri minerale sau a unor transfuzii rapide. În condiții patologice, variațiile volemiei sunt deosebit de importante și frecvente. Se întâlnesc hipervolemii prin creșterea volumului globular în policitemia esențială (*vera*) sau secundară (tuberculoză). Hipervolemii prin creșterea volumului plasmatic apar în ciroza hepatică, hiperaldosteronism. Hipervolemii cu interesarea ambelor compartimente se întâlnesc în hipertiroidism, leucemii.

Hipovolemii patologice apar în urma scăderii volumului plasmatic, în vărsături și diaree severă, hipoproteinemie nefrotică, arsuri. Scăderea volemiei din cursul anemiilor se datorează scăderii numărului de hematii, în timp ce hemoragiile determină hipovolemii prin pierderile înregistrate în ambele compartimente sanguine. Majoritatea variațiilor masei sanguine, precum și compensarea rapidă a acestora se realizează printr-o serie de deplasări corespunzătoare ale apei dinspre compartimentul plasmatic spre compartimentul interstițial și invers. Principalul factor care condiționează aceste deplasări este existența membranei capilare, cu proprietăți de membrană semipermeabilă dializantă. Trecerea apei din vase în interstiții este sub dependența unor mecanisme tensio-osmoreglatoare locale și generale.

* Apreciate colorimetric sau radioizotopic.

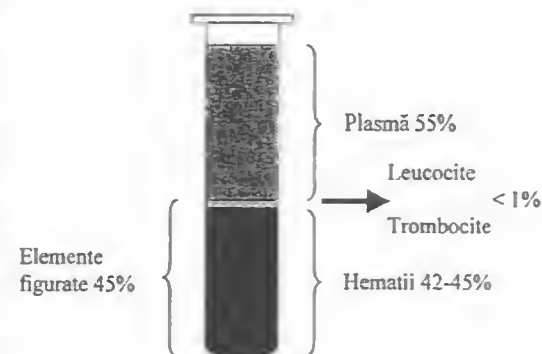


Fig. 5.6. Valorile volumului entro-plasmatic (hematocrit).

5.2.1. COMPOZIȚIA ȘI FUNCȚIILE SÂNGELUI

Asigurând transportul la și de la celule a substanțelor indispensabile menținerii echilibrului homeostazic și activității celulare normale, sângele îndeplinește numeroase funcții fiziologice.

Rolul esențial al sângelui în homeostazie este subliniat de multitudinea funcțiilor pe care le realizează. Într-o succintă și desigur incompletă enumerare, sângele are funcții: circulatorie, respiratorie, nutritivă, excretorie, de menținere a echilibrului hidroelectrolitic, de termoreglare, în protecția organismului etc.

Prin compoziția și substanțele active vehiculate, sângele participă la reglarea principalelor funcții ale organismului, asigurând totodată caracterul lor unitar.

a) **Funcția circulatorie.** Prin volumul și proprietățile sale fizice și chimice, sângele contribuie la menținerea și reglarea presiunii sanguine. Se știe că presiunea sanguină depinde de masa sanguină. Hipovolemia de natură hemoragică, de exemplu, reduce întoarcerea venoasă și, prin aceasta, debitul sistolic, fapt care determină scăderi importante ale presiunii arteriale, mergând până la colaps vascular. Dimpotrivă, hipervolemia, cum ar fi cele din ingestia masivă de apă și săruri, din sarcină, sau hipervolemia din mielomul multiplu (plasmocitom), aduc după ele creșteri ale presiunii arteriale.

Fără a intra în detalii ce nu-și au locul aici, trebuie menționat și rolul prezenței în sângele circulant a cataboliților specifici și nespecifici în determinarea variațiilor de presiune hidrostatică.

b) **Funcția respiratorie.** Sângele realizează transportul de gaze de la plămân la țesuturi, asigurând aportul de oxigen necesar desfășurării normale a proceselor energetice tisulare. La nivel tisular, cedarea oxigenului este însoțită de preluarea CO_2 rezultat din respirație și transportarea sa către zona de eliminare alveolo-capilară.

Transportul sanguin al gazelor se realizează în formă liberă sau fixată, atât în plasmă, cât și în hematii.

c) **Funcția excretorie.** Se realizează prin faptul că sângele este principalul, dacă nu chiar unicul, transportor al cataboliților de la nivel tisular la nivel de organe excretorii. Prin sânge se transportă, spre zonele de eliminare, uree, acid uric, amoniac, compuși cetonici, bioxid de carbon, acid lactic etc. – substanțe rezultate din metabolismul glucidic, lipidic și proteic, a căror acumulare la nivel tisular se însoțește de fenomene toxice.

d) **Funcția nutritivă.** Sângele reprezintă și principalul mijloc de legătură între țesuturi și organele de absorbție a principiilor alimentare. Prin sânge sunt vehiculate spre locul de utilizare glucoza, aminoacizii și lipidele, care asigură desfășurarea normală a metabolismului tisular.

e) **Funcția de menținere a echilibrului hidroelectrolitic.** Una dintre condițiile fundamentale ale homeostaziei organismului – menținerea echilibrului hidroelectrolitic în cele trei compartimente ale mediului intern – se realizează cu intervenția nemijlocită a sângelui. Comunicarea largă, prin cei 6300 mm^2 de suprafață capilară ce se interpun între compartimentul plasmatic și cel interstițial, face ca oricare modificare de compoziție a unui să se repercuteze la nivelul celuilalt și invers. De fapt, sângele reprezintă singura posibilitate de comunicare cu exteriorul a mediului intern și, prin aceasta, principalul mijloc de menținere a echilibrului fizico-chimic ce condiționează desfășurarea normală a proceselor vitale. Se știe că acest echilibru este menținut prin mecanisme tensio-osmoreglatoare locale, reprezentate de echilibrul Starling, și generale, neuro-hormonale.

f) **Funcția de termoreglare.** Menținerea temperaturii constante a organismului – homeotermia – reprezintă un element de bază al homeostaziei generale, condiționând viteza și randamentul reacțiilor metabolice. Acționând ca element de bază în procesele de acumulare și disipare ale energiei termice, sângele joacă un rol central în termoreglare.

g) **Funcția de apărare.** Sângele reprezintă o importantă barieră în calca agresiunii antigenice. Această funcție este realizată prin intermediul unor proteine specifice (anticorpi), precum și prin intermediul elementelor figurate specializate (leucocitele).

h) **Funcția de reglare a principalelor funcții ale organismului.** Sângele intervine, prin proprietățile sale fizico-chimice și prin substanțele active conținute, în reglarea funcțiilor circulatorii, digestive, excretorii etc.

i) **Asigurarea unității organismului.** Realizând o cale de legătură directă între cele mai diferite sisteme și țesuturi, sângele reprezintă, alături de sistemul nervos, un mijloc de asigurare a simultaneității de acțiune a acestor organe și sisteme, simultaneitate ce condiționează adaptarea la condițiile mediului ambiant.

5.2.2. PROPRIETĂȚILE FIZICO-CHIMICE ALE SÂNGELUI

Ca orice corp din natură, sângele beneficiază de o serie de proprietăți de ordin fizic și chimic, cum ar fi culoare, densitate, temperatură, vâscozitate, pH etc., a căror constanță reprezintă adesea una dintre condițiile de menținere a homeostaziei.

Culoarea. Culoarea sângelui îi este conferită de prezența pigmentului respirator, a hemoglobinei din hematii. Culoarea hemoglobinei variază în funcție de starea sa chimică. La nivelul arterelor, unde hemoglobina este saturată cu oxigen 100% (19,5 volume $\text{O}_2\%$), predominanța oxihemoglobinei determină culoarea roșie aprinsă a sângelui. În teritoriul venos, unde saturația în O_2 abia atinge 60% din capacitatea de fixare a hemoglobinei (12,5–14%), cantitatea mare de hemoglobină redusă conferă culoarea roșie închisă sângelui venos. Diferențele de saturație în oxigen explică de altfel și diferențele de culoare dintre sângele din zonele cu circulație activă și sângele zonelor cu circulație lentă, cu grad redus de oxigenare.

Densitatea. Densitatea sângelui depinde de cantitatea și densitatea substanțelor solvite, precum și de numărul de elemente figurate.

Pentru determinarea densității sângelui se utilizează o serie de metode densitometrice.

Valorile normale ale densității sângelui total sunt de 1 061 la bărbați și 1 057 la femei, față de 1 027 pentru plasmă și 1 000 pentru apă. Variațiile densității sângelui pot apărea atât în condiții fiziologice, cât și în condiții patologice. Variații fiziologice apar în cursul ingestiei sau pierderii de lichide. Este de remarcat că, din acest punct de vedere, copiii prezintă o labilitate deosebită, capacitatea lor de compensare a acestor variații fiind în general redusă. Variații patologice: scăderi ale densității sângelui pot apărea în cursul hipoproteinemiei determinate de reducerea sintezei de proteine la bolnavii hepatici, de pierderile prin filtrul glomerular deteriorat la bolnavii renali, de reducerea aportului alimentar în foamea prelungită. Scăderi similare pot apărea și prin reducerea numărului de elemente figurate, ca în cazul anemiilor. Creșteri ale densității sângelui pot apărea prin hiperproteinemie – în cazul mielomului multiplu, prin creșterea numărului de elemente figurate – în cazul poliglobuliilor, în deshidratarea de diverse cauze (vărsături, diaree, transpirații profuze), în hemoconcentrările din cadrul șocului.

Temperatura. Temperatura sângelui variază în medie între 37,7°–38°C, cu un maximum de 40°C la nivelul hilului hepatic și un minimum de 36°C în plămân și pe scrot. Variațiile de temperatură ale sângelui din zonele profunde spre cele superficiale reprezintă exteriorizarea fenomenelor de termoreglare, prin care excesul de energie termică produs în țesuturile active este transportat la periferie și cedat mediului exterior în cantități ce depind de temperatura ambiantă (vezi termoreglarea).

Vâscozitatea. Și astăzi, dintre toate definițiile vâscozității, cea care exprimă cel mai bine fenomenul rămâne cea dată de Isaac Newton, după care vâscozitatea ar fi „lipsa de alunecare între straturi vecine de fluid”. Prin frecarea dintre moleculele diverselor substanțe din sânge, precum și dintre sânge și perete, sunt generate forțe de coeziune ce se opun curgerii sângelui. În felul acesta, rezistența opusă de sânge forțelor ce îl propulsează în patul vascular este direct proporțională cu vâscozitatea. Această relație face din vâscozitatea sângelui una dintre condițiile hidrodinamice de o importanță funcțională deosebită.

Valoarea vâscozității condiționează rezistența periferică și, prin aceasta, însăși presiunea arterială. În același timp, faptul că forțele de frecare dintre peretele vascular și sânge sunt mai mari decât forțele de frecare din interiorul coloanei de lichid face ca și în circulația laminară a sângelui să existe diferențe nete de viteză de deplasare. Viteza axială este mai mare decât cea perietală. Acest fapt ușurează schimbările parietale, prelungind contactul sânge-perete vascular. Este de subliniat că vâscozitatea sângelui reprezintă și unul dintre factorii excitabilității cardiace (vezi capitolul de fiziologie a circulației).

Dintre metodele de determinare a vâscozității sângelui, frecvent este utilizată compararea vitezei de deplasare a sângelui cu cea a apei în tuburi capilare. În acest scop se utilizează viscosimetrul Hess și Oswald. **Valori:** vâscozitatea apei fiind egală cu unitatea, vâscozitatea sângelui este de 4,7 la bărbați și 4,4 la femei, cu o medie de 4,6. Prezența elementelor figurate reprezintă factorul principal în determinarea vâscozității sângelui. Vâscozitatea plasmă este de numai 1,86. **Variații:** anemiile și hemoragiile determină frecvent scăderi ale vâscozității sângelui, însoțite de fenomene de tahicardie. Creșterile vâscozității sângelui pot apărea, de exemplu, prin creșterea numărului de elemente figurate (poliglobulii, leucemii). Aceste creșteri ale vâscozității, mărind rezistența periferică, creează condiții de suprasolicitare cardiacă, care pot evolua spre insuficiență cardiacă cu decompensare.

5.2.3. COMPOZIȚIA PLASMEI SANGUINE

Plasma sanguină este lichidul transparent de culoare ușor gălbuie datorită pigmentilor biliari. Densitatea ei este de 1,027, iar vâscozitatea 1,8. Reprezentând partea lichidă a sângelui, este formată din 90% apă și 10% reziduuri uscate. Acestea din urmă se împart în substanțe organice (9%) și anorganice (1%). La rândul lor, substanțele organice sunt azotate proteice (8%) și neproteice (35 mg%). Substanțele organice neazotate alcătuiesc 1% și sunt reprezentate de glucide, lipide și produșii lor de metabolism. O concentrație aproximativ egală de 1% o constituie substanțele anorganice din plasmă de natură cationică și anionică.

Compoziția plasmei sanguine umane în substanțe organice și anorganice este prezentată în tabelul 5.11:

TABELUL 5.11

SUBSTANȚE ORGANICE DIN PLASMĂ					
Azotate g%			Neazotate mg%		
Substanțe azotate proteice	Albumine	4,5	Glucide	glucoză	100
	Globuline	3		acid lactic	10-20
	Fibrinogen	0,2-0,4	Lipide	acid oxalic	urme
Substanțe azotate neproteice	în mg N%			gliceride	600-800
	Uree	25	acizi grași fosfatide colesterol alcohol		
	Amoniac	urme			
	Acid uric	6-20			
	Creatinină	3,75			
	Ac. aminași	2-3			
	Poliptide Iadican	0,1			
Total în azot 35 mg					

COMPOZIȚIA IONICĂ A PLASMEI

		Plasmă		mEq/l față de apa din plasmă	Lichid inter- stițial mEq/l
		%	mEq/l		
Cationi	Na ⁺	0,3-0,35 g	138-142	152,7	145,1
	K ⁺	15-20 mg	4	4,3	4,1
	Ca ²⁺	10-11 mg	5-5,5	5,4	3,5
	Mg ²⁺	3-4 mg	1,5-2	2,2	1,3
	Total		153	164,6	154
Anioni	Cl ⁻	0,3 g	103	109,9	115,7
	HCO ₃ ⁻	-	26	27,9	29,3
	PO ₄ ³⁻	3-5 mg	6	6,5	6,7
	Alți anioni		17	18,2	0,0
	Proteine				
	Total		153	164,2	154,0
Total mEq la litru			306	328,8	308,0

1. Proteinele plasmatice se găsesc în proporție medie de 7,5 g%, prezentând o mare diversitate. Scăderea lor sub 6 g% poartă numele de hipoproteinemie, iar creșterea peste 8 g%, hiperproteinemie. Variații fiziologice pot apărea în funcție de vârstă. Proteinemia prezintă valori mai mici la nou-născut decât

la adult, urmată în primii trei ani de o creștere progresivă, până la atingerea valorilor normale. Sinteza proteinelor în organism realizându-se din proteinele alimentare, aportul proteic este indispensabil menținerii valorilor normale ale proteinemiei. Plasma sanguină conține trei principale categorii de proteine: albumine, globuline și fibrinogen cu structură și funcții distincte.

Separarea și dozarea proteinelor plasmatice sau serice se poate realiza fie densitometric, colorimetric sau refractometric, fie prin separarea electroforetică pe suporturi solide de hârtie, gel de agaroză sau acetat de celuloză la pH de 8,6. La acest pH toate componentele proteice sunt încărcate negativ și migrează spre anod. După colorare, măsurarea densității optice a electroforegramei dă un maximum de absorbție, ce poate fi separat sub forma a cinci fracțiuni (serumalbumina, fracțiunile α_1 , α_2 , β și γ -globuline) (fig. 5.7).

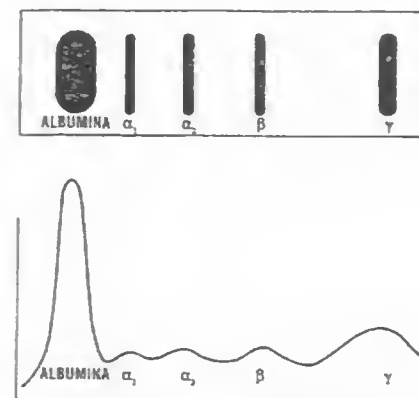


Fig. 5.7. Electroforegrama serului uman.

- Serumalbuminele sunt cele mai abundente proteine plasmatice, reprezentând jumătate din proteinemia totală (3,5-4,5 g%). O cantitate aproximativ egală cu cea din plasmă se află în spațiile extracelulare. Serumalbumina este o fracție omogenă, cu masă moleculară de 68 000 daltoni (68 kDa), formată din 585 de resturi aminoacide în ficat (10-12 g/zi). Concentrația sa moleculară mare asigură 75-80% din presiunea osmotică normală a plasmei necesară menținerii apei în compartimentul intravascular. În plus, serumalbumina leagă o serie de compuși hidrofobi ca bilirubina, acizi grași liberi, vitamine liposolubile, hormoni steroizi sau tiroidei în vederea transportării lor la distanță.

- Frațiunea α_1 -globulinică conține mai mulți constituenți cu greutate moleculară variabilă între 44 100 și 195 000, având funcții transportoare de vitamină B₁₂, hormoni tiroidei. De menționat că eritropoietina aparține acestei fracții.

- Frațiunea α_2 -globulinică prezintă structură și funcții de heptoglobulină ce se fixează pe hemoglobină, împiedicând străbaterea de către aceasta a filtrului renal. Din fracțiunea α_2 fac parte, de asemenea, ceruloplasmina, kininogenul, angiotensinogenul și alți precursori peptidici.

- Frațiunea β -globulinică este reprezentată de proteinele plasmatice cu greutate moleculară între 90 000 și 1,3 milioane de daltoni. O β_1 -globulină este transferina implicată în transportul fierului pe cale sanguină. Frațiunea β_2 -globulinică este bogată în β -lipoproteine (80%) și imunoglobuline β_2 .

- Frațiunea γ -globulinică constituie fracția heterogenă de proteine plasmatice cu greutate moleculară între 150 000 și 180 000 de daltoni. Acestea îndeplinesc un rol crucial ca imunoglobuline (anticorpi) în reacțiile de apărare imunitară declanșate de către diverși determinanți antigenici. Există mai multe clase de imunoglobuline, cu funcții și distribuții diferite (IgA, IgD, IgE, IgG). Spre deosebire de celelalte proteine plasmatice, γ -globulinele sunt sintetizate în ganglionii limfatici și alte organe limfoide de către plasmocite,

celule ce provin prin diferențierea și proliferarea limfocitelor B. Antigenul este stimulul principal al secreției de imunoglobuline specifice. Imunitatea rezultată se poate realiza fie prin mecanisme active ca rezultat al contactului cu antigenul producător de anticorpi specifici, fie pe căi pasive prin introducerea în circulație a anticorpilor deja formați în afara organismului.

– Fibrinogenul este o glicoproteină plasmatică cu greutate moleculară de 340 000 de daltoni. Este sintetizat în ficat, concentrația sanguină variază între 0,2–0,4 g%. Deține un rol cheie în procesul complex al coagulării sângelui.

Alți constituenți proteici ai plasmii sanguine sunt reprezentați de complexe glucido- și lipido-proteice, enzime specifice (factorii coagulării, fibrinolizei, ceruplasmină etc.) și nespecifice (dehidrogenaze, fosfataza alcalină etc.).

În ansamblu, proteinele plasmatică, comportându-se ca o dispersie coloidală, realizează un gradient osmotic față de lichidul interstițial. Presiunea coloidosmotică rezultată reprezintă forța primară responsabilă de prevenirea pierderii excesive de plasmă din capilare în lichidul interstițial asigurând menținerea volumului plasmatic. La aceasta se adaugă participarea proteinelor plasmatică la tamponarea variațiilor de pH și la menținerea vâscozității normale a sângelui. Funcții diferențiate îndeplinesc atât cele trei fracții proteice ale plasmii sanguine, cât și substanțele organice neazotate și anorganice prezente în plasmă.

2. **Substanțele azotate neproteice** ale plasmii sunt reprezentate de produșii de catabolism ai proteinelor (uree, acid uric, creatinină), acizi aminați și polipeptide (glutamină, kinine, hormoni etc.), pigmenți biliari. Azotul conținut în astfel de substanțe micromoleculare constituie fracția neproteică sau reziduală cu valoare normală de 25–35 mg%, revenind în cea mai mare parte azotului ureic (80%).

Substanțele organice neazotate sunt reprezentate de glucidele și lipidele plasmatică întregite de produșii de metabolism ai acestora; ele vor fi reluate și amplu discutate la capitolul X – Metabolismul intermediar și energetic.

Substanțele anorganice ale plasmii sanguine reprezintă 0,9 g%, realizând o concentrație osmolară de 310 mOsm/l. În afară de presiunea osmotică, acestea îndeplinesc importante roluri specifice, începând cu polarizarea membranelor, variațiile excitabilității celulare și pH-ul umorilor și sfârșind cu biosinteza de proteine bioactive sau reglarea activității unor enzime. Din această categorie fac parte Na, K, Ca, Mg, Cl, F, Br, I, Fe, Cu, fosfați, sulfati etc.

Concentrația variabilă a diferitelor substanțe anorganice poate fi exprimată fie în mg%, fie în miliechivalenți la litru (mEq/l). Exprimarea în mEq/l este preferabilă pentru substanțele care prezintă încărcare ionică pozitivă (cationi) sau negativă (anioni). Concentrația în mEq/l se calculează pornind de la greutatea atomică a substanței respective, concentrația acesteia și valența ei după formula:

$$\text{mEq/l} = (\text{greutatea mg/l} \times \text{valența}) / \text{greutatea atomică}.$$

În cazul sodiului, care are o concentrație plasmatică de 325 mg%, valoarea egală cu 1 și greutatea atomică 23, concentrația va fi:

$$\text{Na} = (325 \times 10 \times 1) / 23 = 141 \text{ mEq/l}.$$

Concentrația sa variind între 138–142 mEq/l, ionul monovalent sodiu (Na^+) reprezintă principalul cation care asigură osmolaritatea lichidului extracelular. Repartiția predominant extracelulară contribuie la apariția potențialului transmembranar de repaus și la declanșarea potențialului de acțiune în momentul influxului de sodiu producător de depolarizare membranară. În plus, sodiul, fiind cation hidrofil, participă la menținerea echilibrului hidroelectrolitic și acido-bazic.

La rândul său, potasiul (K^+) este principalul cation intracelular, cu o concentrație plasmatică de 15–20 mg% corespunzând la 4 mEq/l, implicat în realizarea polarizării membranare de repaus și repolarizării din cursul potențialului de acțiune. Intervine în procesele biochimice de sinteză a proteinelor, glicogenului etc.

Calciul (Ca^{2+}) plasmatic se găsește în concentrație de 10–11 mg% (5–5,5 mEq/l) fie sub formă ionizată (liberă), fie legat de proteine. Ionii de calciu contribuie la stabilizarea excitabilității membranelor celulare, la cuplarea excitației cu contracția sau cu secreția, la procesul de coagulare etc.

Clorul (Cl^-) este anionul cel mai important al plasmii și lichidelor extracelulare (103 mEq/l). Se găsește în combinație cu Na^+ , contribuind, sub formă de cloruri, la schimburile lichidiene membranare. Participă la menținerea echilibrului hidro-osmotic și a potențialului membranar de repaus.

Magneziul (Mg^{2+}), predominând intracelular, se găsește în plasmă doar în concentrație de 3–4 mg%, corespunzând la 1,5–2 mEq/l. Influențează activitatea unor enzime (exemplu, ATPaze) și posedă proprietăți inhibitorii neuronale, vasculare etc.

Ionul bicarbonic (CO_3H^-) reprezintă principalul constituent plasmatic (26 mEq/l) implicat în metabolismul celular intermediar și în menținerea echilibrului acido-bazic în limite normale.

Compoziția chimică a plasmii sanguine, deși prezintă variații importante în funcție de teritoriul vascular (arterial, venos, capilar) și starea funcțională a organismului, se menține în limite constante prin reacții adaptative neuro-endocrino-metabolice locale și generale.

5.2.4. PRESIUNEA OSMOTICĂ ȘI COLOIDOSMOTICĂ

În condițiile unei membrane semipermeabile ce separă două lichide de concentrații diferite, se știe că presiunea osmotică este acea forță, pe unitate de suprafață, care, aplicată de partea cu concentrație crescută a membranei, este suficientă pentru a împiedica difuzarea apei dinspre soluția slab concentrată, spre cea parte. Valoarea presiunii osmotice a sângelui este condiționată de concentrația substanțelor difuzibile din plasmă, fie ele disociabile (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} etc.) sau nu (glucoză). În condiții normale, presiunea osmotică este determinată în majoritate (93%) de concentrația sodiului.

Presiunea coloidosmotică (oncotică) se poate defini ca fiind presiunea osmotică conferită sângelui de proteinele din plasmă. Ceea ce caracterizează acest parametru fizic în cazul sângelui este faptul că, pe când substanțele difuzibile pot traversa endoteliul capilar permițând echilibrarea diferențelor de presiune, în cazul proteinelor nedifuzibile echilibrarea unei diferențe de presiune între cele două compartimente nu poate avea loc decât prin circulația apei.

Determinarea presiunii osmotice se realizează în mod curent prin măsurarea unor constante fizice condiționate de această presiune, cum ar fi punctul crioscopic, presiunea de vapori, punctul de fierbere etc.

Determinarea presiunii coloidosmotice (oncotice) se realizează cu ajutorul osmometrelor. În principiu, un osmometru constă dintr-un sac de colodiu fixat la partea inferioară a unui tub gradat. Scufundând sacul în care s-a introdus plasma într-un recipient cu apă, presiunea coloidosmotică a proteinelor plasmii determină pătrunderea apei în sac. Se citește nivelul la care ajunge apa în tubul gradat.

Valori normale (exprimate): valoarea presiunii osmotice se exprimă în osmoli/litru sau mai frecvent în miliosmoli/litru. Un miliosmol reprezintă produsul dintre concentrația milimolară a substanței solvite și plasmă și numărul de particule pe care această substanță le eliberează prin disociere în soluție apoasă. Această exprimare subliniază faptul că presiunea osmotică a unei soluții este condiționată nu atât de concentrația și greutatea moleculară a substanței, cât de numărul de molecule. Din această cauză, în cazul sângelui, presiunea osmotică este determinată în primul rând de clorura de sodiu și nu de glucoză, deoarece prima se află în concentrație mult mai redusă.

În condiții normale, presiunea osmotică a sângelui atinge valori de cca 285 mOsm/l, ceea ce ar corespunde unui punct crioscopic de $-0,56^\circ\text{C}$ sau unei presiuni de 6,7 atmosfere. Valoarea normală a presiunii oncotice a plasmii este de 300–400 mm apă sau 25–28 mmHg.

Presiunile osmotice și coloidosmotice ale plasmii sanguine reprezintă un factor important în menținerea echilibrului hidroelectrolitic al organismului la nivelul tuturor compartimentelor. Acest echilibru se menține prin mecanisme tensio-osmoreglatoare locale și generale. Principalul mecanism tensio-osmoreglator local este reprezentat de echilibrul Starling care, acționând la nivelul întregului pat capilar, reglează schimburile dintre compartimentul plasmatic și cel interstițial.

5.2.5. ECHILIBRUL ACIDO-BAZIC, REACȚIA SÂNGELUI

Plasma este o soluție apoasă de baze și acizi care disociază, eliberând ioni de hidroxid și hidroxil.

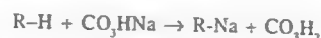
$$\text{pH} = -\log C_{\text{H}^+}$$

Neutralitatea chimică se obține la un pH de 7. În cazul plasmiei, la o concentrație de ioni de hidrogen de 10^{-7} , pH-ul va fi egal cu 7,4, cu variații între 7,30 și 7,42, ceea ce corespunde unei ușoare alcalinități; pH-ul intracelular este ceva mai apropiat de neutralitate, variind între 7,0 și 7,2.

Menținerea pH-ului sanguin este de o importanță deosebită pentru organism, având în vedere faptul că în cursul metabolismului rezultă mari cantități de H^+ ce tind să reducă pH-ul sub limitele foarte strânse în care el este compatibil cu desfășurarea normală a proceselor vitale.

Determinarea acestui parametru sanguin, asupra importanței căruia este inutil să insistăm, se realizează printr-o multitudine de metode, dintre care mai importante sunt:

a) calcularea rezervei alcaline reprezintă metoda cea mai convenabilă de investigare a echilibrului acido-bazic. În principiu, metoda constă din determinarea cantității de bicarbonat din sânge. Se știe că principalul tampon sanguin este sistemul bicarbonat/acid carbonic. Pe măsură ce în circulație sunt aruncați acizi organici sau anorganici tari, cu mare putere de disociere, sistemul intervine, transformându-i în săruri neutre și un acid organic slab – acidul carbonic. Acesta se elimină rapid pe cale respiratorie. Transformarea are loc prin utilizarea bicarbonaților din circulație:



În circulație există o cantitate de bicarbonați cunoscută sub numele de rezervă alcalină. Valoarea acesteia reprezintă capacitatea organismului de a combate tendința la acidoză și de a menține constant echilibrul acido-bazic. Între cantitatea de bicarbonați din sânge și cantitatea de acid carbonic, ambele exprimate în volume de CO_2 degajate prin descompunere, există un raport constant:

$$\frac{CO_3HNa}{CO_2H_2} = \frac{60 \text{ vol. } CO_2}{3 \text{ vol. } CO_2} = 20$$

Din această relație se poate determina pH-ul sanguin:

$$pH = 6,1 + \log \frac{CO_3H^-}{CO_2} \quad (\text{Ecuația Henderson-Hasselbach})$$

Astfel, este de la sine înțeles de ce determinarea cantității de bicarbonați (rezerva alcalină) reprezintă un important indicator privind echilibrul acido-bazic și capacitatea de tamponare a organismului.

Valorile normale ale rezervei alcaline sunt de 45–50 volume $CO_2\%$ pentru sângele venos. Din păcate, în varianta sa originală metoda este frecvent criticată pentru lipsa unei standardizări satisfăcătoare. Datărită acestui fapt se recomandă utilizarea unor variante perfecționate;

b) metoda micro-Astrup combinată cu utilizarea nomogramei Siggard-Andersen reprezintă cea mai precisă tehnică disponibilă actualmente pentru determinarea pH-ului sanguin. În sângele arterial sau capilar recoltat etanș se determină direct pH-ul înainte și după echilibrarea cu două presiuni diferite de CO_2 . Valorile obținute permit calculul presiunii parțiale a CO_2 în sângele subiectului, al rezervei tampon totale, precum și al excesului de bază. Utilizarea acestei determinări permite o ajustare fină și adecvată a eventualelor dezechilibre acido-bazice.

5.2.5.1. Variațiile fiziologice ale pH-ului sanguin

Având în vedere cât de reduse sunt variațiile pH-ului sanguin în condiții normale, este lesne de înțeles de ce orice abatere de la limitele citate mai sus are un rol extrem de important pentru desfășurarea normală a proceselor biochimice din organism. Se știe că orice scădere a pH-ului sub 7,3 și a rezervei alcaline sub 40 volume $CO_2\%$ echivalează cu intrarea organismului în acidoză. La pH 7,6–7,8 apare starea comatoasă,

iar la 6,8 – moartea. Creșterea pH-ului peste 7,42 determină intrarea organismului în alcaloză. La pH 7,6–7,8 apare coma, iar la pH 8 survine decesul.

În condiții fiziologice există posibilitatea unor ușoare variații ale echilibrului acido-bazic, rapid compensate și fără repercusiuni asupra stării generale. Se știe că digestia gastrică, prin pierderea unei mari cantități de H^+ se însoțește de alcaloză. Digestia intestinală, prin pierderile mari de bicarbonați în suc pancreatic și intestinal, determină o ușoară tendință la acidoză. În cursul nopții, reducerea schimburilor respiratorii și acumularea CO_2 determină acidoză de somn, mai evidentă spre sfârșitul nopții. Vârstele tinere și foarte tinere se însoțesc de o tendință spre alcaloză; pH-ul crescut la 7,4–7,42 cu o rezervă alcalină de peste 72 volume $CO_2\%$ favorizează anabolismul și procesele de creștere ale organismului. La vârstele înaintate, înrăutățirea condițiilor de hematoză pulmonară și de schimb tisular, alături de alte alterări generale ale metabolismului, determină o tendință la acidoză. Aceasta poate deveni importantă mai ales când se suprapune peste acidoză de somn. Astfel se explică de ce decesele bătrânilor au loc, de obicei, în primele ore ale dimineții, când organismul este pus în cele mai proaste condiții metabolice. Tendința la acidoză a organismului vârstnic poate fi privită și ca favorizând apariția mai frecventă a neoplasmului. Se știe că, după teoria lui Otto Warburg, cancerul ar fi determinat de devierea anaerobiotică a metabolismului.

Efortul fizic reprezintă o altă cauză de acidoză, datorită acumulării de cataboliți acizi și, mai ales, de acid lactic. Această acidoză de efort este nefavorabilă vârstelor tinere. Conform legii lui Peters – între creștere și alcalinitate se stabilește o proporționalitate directă. Datorită acestui fapt, până la vârsta de 16–18 ani se interzice practicarea eforturilor fizice grele și susținute. Prin acidoză provocată, aceste eforturi pot duce la fenomene de subdezvoltare fizică și chiar psihică.

5.2.5.2. Mecanismele menținerii echilibrului acido-bazic

Reglarea și menținerea echilibrului acido-bazic se realizează prin mecanisme fizico-chimice ce apelează la sistemele tampon sanguine și mecanisme biologice specifice anumitor organe, cum ar fi plămânul, ficatul, rinichiul, pielea etc.

a) Mecanisme fizico-chimice (sistemele tampon): se știe că cei doi termeni ai oricărui sistem tampon sunt reprezentați fie de un acid slab și sarea sa cu o bază puternică, fie de o bază slabă și sarea sa cu un acid tare. Sistemul tampon acționează în sensul reducerii amplitudinii variațiilor de pH. În prezența unui acid tare, sistemul tampon îl transformă în sarea corespunzătoare, formând cantități echivalente de acid slab. Fiind puțin disociabil, acesta determină o acidifiere a mediului mult redusă față de cea determinată de acidul tare.

În organism există cinci sisteme tampon importante, și anume: sistemul bicarbonat/acid carbonic; sistemul hemoglobină redusă/hemoglobină de potasiu; sistemul oxihemoglobină/oxihemoglobină de potasiu; sistemul fosfat monosodic/fosfat disodic; sistemul proteine acide/proteine alcaline.

Dintre mecanismele implicate în tamponarea excesului de sarcini acide, o importanță deosebită prezintă așa-zisul fenomen Hamburger. Acest mecanism presupune intervenția sistemului acid carbonic/bicarbonat și a sistemelor hemoglobinice în scopul transformării CO_2 rezultat din arderile tisulare în bicarbonat de sodiu. Reprezentând principala posibilitate de neutralizare a acidului carbonic, precum și principala sursă de bicarbonat, fenomenul condiționează neutralizarea acizilor organici nevolatili (acid lactic, beta-oxibutiric, acetilactic) rezultați din metabolismele intermediare. Mecanismul se bazează pe faptul că oxihemoglobina se comportă ca un acid puternic, cu capacitate mare de disociere. Prin disociere, oxihemoglobina se transformă în hemoglobină redusă, care se comportă ca un acid slab. În acest mod se realizează o variație de pH intrahematic care, prin diferențe de sarcină electrică, determină o suită de fenomene de membrană. După cum fenomenul are loc la nivel tisular sau la nivel de plămân, se vorbește despre un fenomen Hamburger direct, periferic, și un fenomen Hamburger indirect, pulmonar.

Fenomenul Hamburger direct are loc la nivel tisular (fig. 5.8). În plasma de la nivelul capilarelor tisulare pătrunde bioxidul de carbon rezultat din arderile tisulare. Ajuns în mediul apos, bioxidul de carbon se transformă în acid carbonic, care disociază în ioni bicarbonat și hidrogen ioni, ce tind să reducă pH-ul. La același nivel, plasma conține cantități importante de clorură de sodiu disociată.

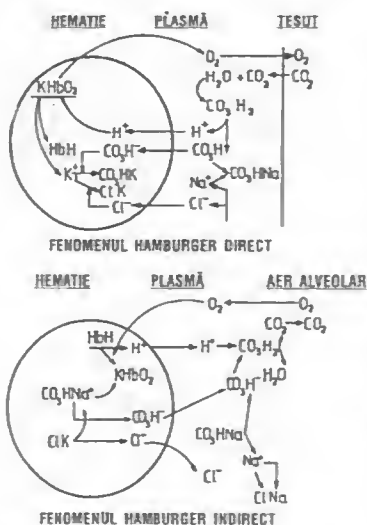


Fig. 5.8. Fenomenul Hamburger direct, periferic, și indirect, pulmonar.

bicarbonați suficiente pentru neutralizarea acizilor tari nevolatili rezultă din metabolism iar, pe de altă parte, marea majoritate a CO_2 se transportă într-o formă neutralizată spre plămâni, unde fenomenul Hamburger indirect contribuie la eliminarea sa pe cale respiratorie.

Fenomenul Hamburger indirect are loc la nivel pulmonar (vezi fig. 5.8). În capilarele pulmonare, presiunea parțială crescută a oxigenului din plasmă determină pătrunderea acestuia în hematii, unde înfrumățează oxihemoglobina. Deplasarea H^+ determină o scădere a pH-ului de la 6,8 la 6,6. Datorită acestui fapt, hidrogenul ionic și ionii de bicarbonat ies din hematii în plasmă. La acest nivel se refacă acidul carbonic, care se descompune în CO_2 , difuzând spre alveolă și aer. În același timp, clorura de potasiu din hematii disociază în ioni de potasiu, ce refacă oxihemoglobina de potasiu, și ionii de clor, care ies în plasmă, refăcând clorura de sodiu.

b) Mecanisme biologice de menținere a echilibrului acido-bazic:

- **plămânii** intervin în menținerea echilibrului acido-bazic prin eliminarea CO_2 provenit fie din respirația tisulară, fie din tamponarea acizilor organici nevolatili rezultă din metabolismul intermediar. Această eliminare este explozivă, de 20 de ori mai rapidă decât pătrunderea O_2 . Orice reducere a eliminării prin permeabilitatea scăzută a membranei alveolo-capilare sau prin căderea mobilității toracice duce la acidoze gazoase. Prin hiperventilație se realizează alcaloză gazoasă;
- **rinichii:** mecanismele renale sunt descrise la capitolul respectiv;
- **pielea,** eliminând prin transpirație excesul de sarcini acide sau alcaline, reprezintă echivalentul funcțional al unui rinichi;
- **ficatul,** prin funcția proteofnmatore, ca și prin funcțiile de oxidare a acidului lactic, de sulfo- și glucurononconjugare a cataboliților acizi, joacă un rol extrem de important în echilibrul acido-bazic al organismului;
- **tubul digestiv** reprezintă una dintre căile de eliminare a excesului de sarcini acide sau alcaline;
- **aparatură cardio-vasculară** își aduce contribuția și la acest aspect al homeostaziei generale, realizând omogenizarea și transportul sarcinilor în exces spre organele cu rol de eliminare.

5.2.5.3. Variațiile patologice ale pH-ului sanguin

Cunoscând principalul mecanism de înfrumățeare a rezervei alcaline, precum și faptul că pH-ul sanguin este condiționat de raportul bicarbonați/acid carbonic, devine posibilă explicarea câtorva dintre mecanismele ce determină variații fiziologice și patologice ale pH-ului sanguin. Aceste variații apar fie în sensul acidozei, fie variațiile patologice ale echilibrului acido-bazic în sensul alcalozei.

Acidoza. În esență, acidozele se datorează scăderii valorii raportului bicarbonat/acid carbonic din cadrul ecuației Hendersson-Hasselbach. Aceste scăderi pot apărea fie prin creșterea cantității de acid carbonic, fie prin scăderea cantității de bicarbonați. Din acest punct de vedere, acidozele pot fi gazoase sau negazoase.

- **Acidozele gazoase** apar prin acumularea CO_2 în circulație. Se întâlnesc în afecțiunile respiratorii, cu reducerea suprafeței de schimb alveolo-capilare (fibroze, bronhopneumonii). Apar, de asemenea, în afecțiuni ce se repercutează asupra dinamicii respiratorii. În cazul obezității, reducerea excursiei toracice scade posibilitatea eliminării de CO_2 . O situație similară este și cea din cazul acidozei de somn.

- **Acidozele negazoase** sunt scăderi ale rezervei alcaline ce apar prin eliminarea excesivă de bicarbonați (transpirații profuze, vărsături incoercibile, diaree, insuficiență renală, fistulă biliară). În aceeași direcție acționează și consumul excesiv de bicarbonați, cu scopul de a neutraliza acizii produși în cantități mari (diabet, efort fizic).

Alcaloza. Poate fi gazoasă sau negazoasă (metabolică).

- **Alcalozele gazoase** apar în hiperventilațiile pulmonare, când se produc eliminări excesive de CO_2 . Astfel de situații sunt uneori create în mod vnit în cursul probei de hiperpnee voluntară, utilizată ca mijloc de activare și explorare în electroencefalogramă.

- **Alcalozele negazoase** sunt de origine metabolică. Ele pot apărea, de exemplu, în hipokaliemii, când scăderea potasiului circulant face ca la nivel de tub renal distal reabsorbția sodiului să se producă exclusiv prin schimb cu ionii de hidrogen. Astfel de alcaloze pot apărea și prin aport excesiv de substanțe alcaline în alimente (regim vegetarian).

5.2.6. HEMATIIILE

Din cei aproximativ 5-5,5 litri de sânge, aproape pe jumătate (2,3-2,5 litri) sunt reprezentați de hematii.

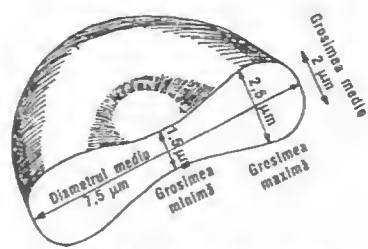
Fără de acest volum eritocitar considerabil, restul elementelor figurate din sânge, în ciuda importanțelor funcții pe care le îndeplinesc, reprezintă o fracțiune cantitativ redusă. Astfel, leucocitele circulante într-un volum total de 25 ml, în timp ce trombocitele sunt neînsemnate din acest punct de vedere.

Utilizând microscopul descoperit în 1674, Anthony van Leeuwenhoek remarcă pentru prima oară prezența în sânge a unor corpusculi colorați, înfrumățe de discuri biconcave, care, la nivel de capilare, sunt antrenate într-o circulație de tip laminar. El reușește, cu mijloacele primitive de care dispunea, să aprecieze dimensiunea lor ca fiind aproximativ a milinana parte din diametrul unui grăunte de nisip marin. Această valoare, cca 10 μm , este uimitor de apropiată de cea reală.

În 1682, Swammerdam observă și publică faptul că intestinul este perfuzat de corpusculi cu conținut lichid. Ceva mai târziu, în 1687, Malpighi descrie prezența în sânge a unor globule de „grăsime” de culoare roșie coral. Ulterior, Charles Robin le denumește hematii, de la grecescul „haima” (sânge).

5.2.6.1. Date de morfologie funcțională

Formă. Hematiile sunt elemente celulare anucleate, având înfrumățe unor discuri bi- sau uniconcave (fig. 5.9). Această formă este comparată adesea cu cea a unui biscuit de șampanie. Prezența concavității le conferă o serie întreagă de avantaje funcționale, cum ar fi, de exemplu, echidistanță și suprafață de schimb maximă, asociate cu o mare rezistență la variațiile de presiune osmotică. Hematia este capabilă să treacă prin mari modificări de volum, fără ca integritatea membranei să fie periclitată.



Suprafața medie (SEM) = 130 μm² (120-140)
Indicele de sfericitate (IS) = 3,4 (2,4-4,2)

Fig. 5.9. Aspectul tridimensional al eritrocitelor normale (microscopie electronică stereoscan).

Eritrocitul se caracterizează, în general, printr-o plasticitate deosebită. Orice forță de ordinul a $3 \cdot 10^4$ dyne este capabilă să-l deformeze. Astfel de forțe apar la nivelul circulației capilare, unde eritrocitul ia adesea forme variate (ciupercă, parașută etc.). Datorită acestei plasticități, eritrocitul poate traversa pori de 2,3-3 μm, fără a fi distrus. Această plasticitate se pierde odată cu îmbătrânirea celulei.

Tonicitatea mediului influențează, de asemenea, forma hematiei; datorită proprietății acesteia de a se comporta ca un osmometru. Plasat într-un mediu hiperton, eritrocitul se retragează, devenind foarte plat. În medii hipotone el se umflă, prezentând inițial o formă de dom și apoi o formă sferică. Volumul său crește până la atingerea valorii critice de hemoliză. În acest moment, în membrană apar pori de peste 100 Å diametru, prin care hemoglobina iese din celulă. După pierderea pigmentului, membrana golită își revine forma biconcavă, iar porii dispar. Această „fantomă celulară” a fost utilizată în studiile privind transportul transmembranar.

Alături de aceste variații normale, forma eritrocitului poate prezenta variații patologice, ce constituie elemente prețioase de diagnostic hematologic (sferocite, ovalocite, siclocite etc.) (fig. 5.10).

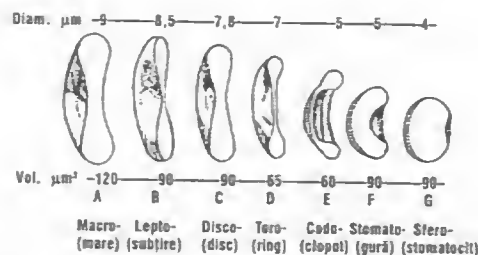


Fig. 5.10. Profile de eritrocite (după Bessis, 1972). A: Anemie pernicioasă. B: Icter obstructiv. C: Hematie normală. D: Anemie hipocromă. E: Talasemie. F: Stomatocitoză. G: Sferocitoză ereditară.

Dimensiune. Hematiile suspendate în plasmă au un diametru de 7,5-8,3 μm, care scade odată cu înaintarea în vârstă a celulei. Grosimea atinge valori de cca 1,7 μm, iar volumul eritrocitar prezintă valori de 87 ± 5 μm³. Suprafața unei hematii este de 125-145 μm², ceea ce corespunde, pentru totalul hematiilor circulante, unei suprafețe de 2 500 m² afectate proceselor de schimb gazos. În condiții patologice pot apărea hematii de dimensiuni anormale, cum ar fi macrocitele, microcitele etc. Anizocitoza este termenul utilizat pentru a indica variabilitatea dimensiunilor eritrocitare datorită apariției hematiilor tinere, de dimensiuni mari.

Reprezentarea grafică a distribuției procentuale a diametrelor celulare (curba Price-Jones) este folosită pentru descrierea aceleiași variabilități. Predominanța diametrelor mari urmează reacția medulară compensatorie caracteristică în unele anemii hemolitice. Principalii indici eritrocitari sunt reuși în tabelul 5.III.

TABELUL 5.III

Constante și Indici eritrocitari

Constantă	Calcul	Valoare normală	Creșteri	Scăderi
Volumul eritrocitar mediu (VEM)	$VEM = \frac{Ht \times 10}{E}$	80-94 μm ³	94 - macrocitoză	80 - microcitoză
Hemoglobina eritrocitară medie (HEM)	$HEM = \frac{Hb \times 10}{E}$	25-32 μg	32 - când VEM este crescut	25 - anemie feriprivă severă
Concentrația medie Hb eritrocitară (CHEM)	$CHEM = \frac{Hb \times 100}{Ht}$	32-36 g/dl masă eritrocitară	nu există	30 - anemie feriprivă
Grosimea eritrocitară medie (GEM)	$GEM = \frac{4 \cdot VEM}{\pi(DEM)^2}$	1,7-2,5 μm	2,5 - sferocitoză	1,7 - platicitoză
Suprafața eritrocitară medie (SEM)	$SEM = \frac{\pi(DEM)^2}{2} + \frac{VEM}{DEM}$	120-130 μm ²	120 - microcitoză	130 - macrocitoză
Indicele de culoare (Valoarea globulară - VG)	$VG = \frac{Hb\% \text{ determinat}}{Hb\% \text{ normală}}$ $VG = \frac{Nr. \text{ hematii determinat}}{Nr. \text{ hematii normale}} = \frac{Hb\%}{E \times 2}$ (E = primele două cifre ale numărului de hematii/mm ³)	0,85-1,15 μm ³	0,85 - hipocromie	1,15 - hipercromie

Culoare. Privite la microscopul obișnuit, hematiile suspendate au o culoare roșie-portocalie, determinată de prezența hemoglobinei. Zona centrală este mai palidă, datorită grosimii reduse a celulei. La microscopul cu contrast de fază ele apar gălbui, cu o ușoară nuanță de roșu brun.

Conținutul în hemoglobină al hematiei nu poate fi modificat decât în sensul scăderii. Hipocromia este considerată ca reală atunci când paloarea centrală depășește 1/3 din diametrul celulei. Culoarea roșie-portocalie aprinsă este caracteristică oxihemoglobinei din sângele arterial. Carbohemoglobina și hemoglobina redusă din sângele venos au o culoare mai închisă. Carboxihemoglobina ce apare în intoxicațiile cu oxid de carbon are o culoare roșie deschisă, în timp ce methemoglobina este roșie brună.

Structura hematiei. Element celular anucleat, hematia este formată dintr-o membrană și un conținut. Membrana hematică este o formațiune bistratificată, formată din particule proteice de 80-100 Å, înglobate într-o masă lipidică. Suprafața externă prezintă numeroase microextruzii fine - la hematiile tinere, și mult dezvoltate - la hematiile în curs de îmbătrânire. Suprafața internă prezintă numeroase particule de 70-200 Å (cca 500/μm²), precum și filamente cu diametrul de 100 Å orientate spre citoplasmă, formând rețeaua internă descrisă clasic sub numele de stromă globulară. În ochiurile stromei se așează hemoglobina sub forma unor particule cu diametrul de 65 Å, mai concentrate la periferie.

Numărul de hematii. În condiții normale, numărul de hematii atinge la bărbat cifra de $5 \cdot 10^6 \pm 500 \cdot 10^3$ /mm³ sânge, în timp ce la femeie variază în jurul valorii de $4 \cdot 600 \cdot 10^3 \pm 500 \cdot 10^3$ /mm³ sânge. Rolul esențial al hematiilor în transportul de oxigen către țesuturi justifică atenția deosebită ce se acordă variațiilor acestor constante.

Fără a mai discuta metodele de apreciere a cantității de hematii, este necesar să se insiste asupra semnificației funcționale a acestor variații.

Creșterile numărului de hematii pot fi de natură fiziologică sau patologică. La vârstele tinere, caracterizate printr-un consum exagerat datorită proceselor de creștere, numărul de hematii depășește valorile de mai sus. În aceeași categorie, a variațiilor normale, intră și valorile mari întâlnite la sexul masculin. Viața la altitudine, în condițiile unei reduceri a presiunii parțiale a O₂ atmosferic, determină

poliglobulia de altitudine. Poliglobulii de tip funcțional pot apărea și în urma efortului fizic, prin hemoconcentrație, în emoții, în stările de deshidratare. Poliglobulii patologice apar frecvent în bolile însoțite de hipoxie tisulară, cum ar fi insuficiența cardiacă, tuberculoza pulmonară etc.

Scăderile numărului de hematii pot apărea, de asemenea, în condiții fiziologice sau patologice. Scăderile fiziologice ale numărului de hematii pot apărea prin hemodiluție în situația unei ingestii exagerate de apă sau la persoane ce muncesc în condiții de presiune atmosferică crescută (hiperbarism), cum ar fi minierii, chesonistii, scafandrii. Scăderile patologice ale numărului de hematii sunt extrem de frecvente în clinica medicală. Ele pot fi de diverse cauze (hemoragii, icter hemolitic, anemii prin deficit de formare).

Viteza de sedimentare (VSH). Dacă o cantitate de sânge devenit necoagulabil prin recoltare pe soluție de citrat de sodiu este lăsată în repaus, la partea inferioară a vasului se sedimentează elementele figurate cu o viteză ce poate fi determinată prin măsurători la intervale precise. Observat încă din perioada galenică, fenomenul a trezit interesul în secolul al XVIII-lea, când s-au încercat primele explicații. Abia un secol mai târziu s-a observat corelația dintre viteza de sedimentare și numeroase stări patologice. Determinarea vitezei de sedimentare s-a răspândit ca test clinic abia în 1924, când Westergreen a standardizat metoda de determinare, ce-i poartă numele.

În cursul sedimentării se descriu trei faze: (1) faza inițială, în care viteza crește treptat, pe măsură ce hematii se adună în agregate mari (fișicuri, rulouri); (2) faza de decantare, în care viteza de coborâre este maximă și practic constantă, corespunzând sedimentării rapide a rulourilor formate; (3) faza de coborâre lentă (sinereză), în cursul căreia viteza de coborâre scade treptat, ajungând la zero.

Sedimentarea este afectată de două procese. Primul este de ordin biologic, fiind reprezentat de formarea agregatelor de hematii în formă de rulou (fișic). Acest proces depinde de factori plasmatici și globulari. Al doilea este de natură fizică, fiind reprezentat de sedimentarea agregatelor formate.

Factorii plasmatici: dimensiunea agregatelor eritrocitare depinde în mare măsură de prezența unor proteine plasmatiche. Dintre aceste proteine, unele (fibrinogenul, alfa₂-macroglobulinele, imunoglobulinele M, A și G, alfa₂-glicoproteinele), favorizând agregarea, măresc VSH. Astfel se explică accelerarea VSH în stările în care sunt crescute globulinele serice (infecții acute și cronice, boli hepatice, nefroze etc.) sau fibrinogenul (menstruație, sarcină). Pe de altă parte, albuminele inhibă formarea de rulouri. Odată adsorbite pe hematii, ele fixează la rândul lor diferiți anioni (acizi grași, lizolecitine) ce acționează asupra membranei hematice accelerând VSH abia după saturarea albuminei. Formarea agregatelor depinde de forțele de repulsie electrostatică dintre hematii. Se consideră că albuminele ar acționa mărind numărul sarcinilor electronegative, în timp ce globulinele, neutralizând această încărcare, ar favoriza sedimentarea. La aceste efecte repulsive ar contribui și constanta dielectrică a plasmăi, a cărei creștere favorizează agregarea. Astfel se explică de ce creșterea vâscozității determină accelerarea VSH. Datorită calităților particulare prezentate, fibrinogenul și globulinele contribuie la vâscozitatea plasmăi de 2-5 ori mai mult decât albuminele.

Factorii eritrocitari: mărimea, densitatea și, prin urmare, sedimentarea rulourilor sunt influențate de numărul, morfologia și conținutul hemoglobinic al hematiilor. VSH este invers proporțional cu hematocritul. Anizocitoza, determinând formarea de rulouri neuniforme, poate determina sedimentarea în straturi. Echinocitoza, sferocitoza, leptocitoza împiedică formarea de agregate, încetinind viteza de sedimentare, ca și în cazul hipocromiei. Reducerea numărului de grupări sialice electronegative la exteriorul membranei accelerează VSH. Este de subliniat afectarea VSH de prezența unor substanțe medicamentoase.

Metoda de determinare (tehnica Westergreen): sângele venos (0,8 ml) se recoltează pe nemăncate în 0,2 ml soluție 3,8 g% citrat de sodiu. Se aspiră amestecul într-un tub Westergreen standard (lungime: 30 cm; diametru intern: 2,5 mm), până la diviziunea 200 mm. Tubul se lasă în poziție verticală și se citește nivelul de separare la o oră și la două ore. (Valori normale: 1-3 mm/oră la bărbați; 4-7 mm/oră la femei.)

5.2.6.2. Date funcționale privind hematopoieza

Hematopoieza este procesul de formare a hematiilor necesare transportului de O₂ la nivelul țesuturilor, fenomenelor de hemostază și apărare împotriva agresiunilor de diferite cauze. Acest proces complex necesită:

1. Dezvoltarea progresivă a caracterelor structurale și funcționale specifice unei anumite serii celulare prin diferențiere și maturare.

2. Proliferarea continuă celulară în vederea menținerii în limite normale a celulelor sanguine. Producerea neîntreruptă a elementelor figurate ale seriei roșii este asigurată de un număr redus de celule din măduva hematopoietică, denumite celule stem pluripotente.

Filogenie. Pe scară animală, hemoglobina apare la paramecium. Hematiile apar la viermi. Hematiile anucleate apar la annelidae.

Ontogenie. Până în luna a V-a a vieții embrionare nu există cavități osoase. În consecință, sediul proceselor de hematopoieză suferă o deplasare în etape succesive (fig. 5.11):

- etapa mezoblastică (0-2 luni): hematii nucleate mari, caracteristice acestei perioade, se formează în insulele de țesut mezenchimatos de la nivelul sacului vitelin;

- etapa hepatică (2-5 luni): în această perioadă hematopoieza este preluată de ficat, splină, timus și ganglionii limfatici, care produc hematii anucleate;

- etapa medulară: începând cu luna a V-a a vieții embrionare se dezvoltă măduva osoasă roșie (hematogenă). La naștere, ea atinge o greutate de 70-80 g (ocupă în întregime cavitățile osoase) și este capabilă să preia total hematopoieza. La vârsta de aproximativ 4 ani încep să apară cantități semnificative de măduvă galbenă nefuncțională. În jurul vârstei de 18 ani, măduva roșie atinge greutatea adultă 2 500 g. Cel mult 50% din această cantitate este necesară pentru acoperirea necesarului curent de hematii. Datorită acestui fapt, transformarea treptată și reversibilă în măduvă galbenă și ulterior fibrozarea (măduvă cenușie), ce apar în cursul vieții, nu afectează esențial numărul de elemente figurate. Măduva hematogenă activă este localizată la nivel de vertebre, stern, coaste, precum și în epifizele proximale ale femurului și tibiei.

Cinetica eritropoiezei. Pornind de la celula primordială și trecând prin dezvoltarea normoblastică spre hematia adultă, seria eritocitară reprezintă un tot unitar în dezvoltare. Totalitatea celulelor eritropoietice și a eritrocitelor adulte este privită astăzi, prin prisma unei concepții hematologice moderne și unitare, ca reprezentând un organ funcțional dispersat, dar unic. Pentru definirea sa, se utilizează larg termenul de *eritron*. Ca orice alt organ și sistem, acest ansamblu este specializat în producerea și utilizarea pigmentului respirator. Orice modificare funcțională adaptativă sau patologică apărută la nivelul unei verigi a sistemului determină reacții compensatorii de ansamblu, similare cu cele din alte organe și sisteme. Elementele celulare componente ale eritronului vor fi prezentate în ordinea cronologică a apariției lor (fig. 5.12).

a) **Celula primordială** este denumită și celulă matcă (celulă stem). Identitatea sa a fost mult discutată, criteriile morfologice de identificare nefiind bine definite. Conform teoriei uniciste, celula matcă reprezintă un element multipotențial, capabil să devină capul de serie atât în eritropoieză, cât și în leuco- sau trombopoieză. La nivel de măduvă, celulele de acest tip ar forma un „pool” cu două compartimente: primul

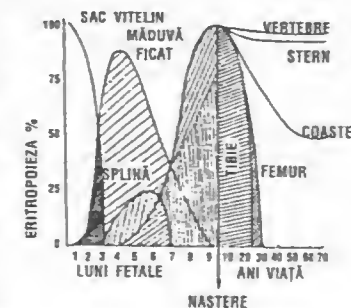


Fig. 5.11. Ontogenia eritropoiezei.

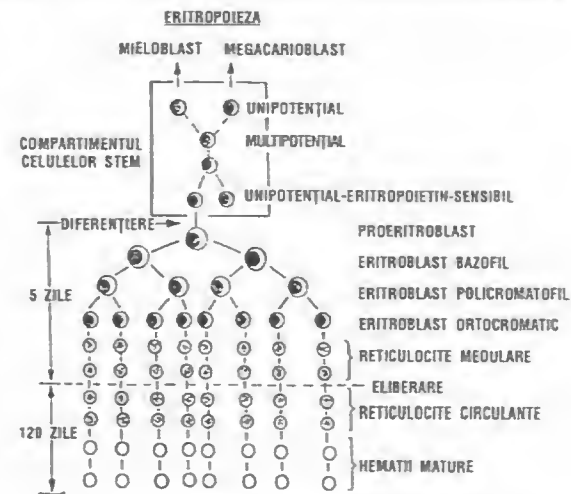


Fig. 5.12. Model dinamic de eritropoieză. Se observă compartimentul celulelor Stern și diferențierea în stadii succesive.

compartiment este format, din celule multipotențiale, cu *turnover* lent (rezervă), iar al doilea este format din celule programate unipotențiale și care dau naștere rapid fie seriei roșii, fie seriei albe. Programarea acestor celule este determinată de apariția în micromediul inductor de hematopoieză a unor factori specifici (de exemplu, eritropoietina; BPA – factorul promotor de puseu secretat de macrofage; CSF – factorul stimulator de colonii).

Celulele stem latente sunt stimulate de o citokină capabilă să inducă proliferarea rapidă a acestora prin intermediul unui receptor specific (c-kit pozitiv). Ele vor da naștere la două tipuri de celule: celula stem mieloidă și celula stem limfoidă.

Celulele stem mieloidă fiind multipotente, se vor diferenția în variate tipuri de celule progenitoare care vor urma linia de maturare în eritrocite, neutrofile, eozinofile, bazofile, mastocite, monocite și trombocite.

Celulele stem limfoide vor genera celule progenitoare unipotente care se vor matura, transformându-se în limfocite B și T.

5.2.6.3. Reglarea eritropoezei

Eritropoeza moleculară se desfășoară în trei etape: etapa de diviziune, etapa de maturare și etapa de lansare în circulație.

În *etapa de diviziune*, celula stem multipotentă se divide într-un element identic și altul precursor al seriei eritrocitare. Eritropoietina se atașează pe celulele eritroide precursor, pe care le stimulează să se diferențieze și să prolifereze, înmulțindu-se, pentru a da naștere proeritroblastului, prima celulă a seriei eritrocitare (fig. 5.13).

Proeritroblastul este o celulă mare, intens bazofilă, cu nucleul de dimensiuni mari. În etape succesive, proeritroblastul se multiplică, producând doi eritroblaști bazofili, ce vor da naștere eritroblastului policromatofil formator de hemoglobină de către ARN în exces. Din diviziunea eritroblastului policromatofil provin doi eritroblaști oxifili (acidofili), care conțin mari cantități de hemoglobină. Eritroblaștii oxifili își pierd nucleul, transformându-se în reticulocite (eritrocite tinere) fără diviziune celulară. Acestea continuă să sintetizeze hemoglobină și prezintă mișcări amoebiene.

Reticulocitele se desprind de prelungirile celulelor reticulare centrale și stabilesc contacte strânse cu fața externă a endoteliului capilar, pe care îl vor traversa spre lumenul capilar.

În *etapa de maturare*, are loc reducerea până la dispariție a dimensiunilor nucleului și creșterea progresivă a conținutului de hemoglobină în paralel cu scăderea ARN ribozomal.

Procesul de lansare se realizează prin mișcări active denumite citodiabază. După 24-48 de ore de la lansarea reticulocitelor în circulație, are loc maturarea și transformarea lor în eritrocite. Reticulocitele se găsesc în sângele circulant în proporție de 0,5-1,5%. Durata medie de viață a eritrocitelor mature este de 120 de zile.

La rândul lor, celulele sușe precursor de celule hematopoietice sunt reglate de către un factor de creștere a celulei stem în configurație cu citokinele IL-3, IL-4, IL-6, IL-11 și IL-12. Efectul maxim asupra receptorului coloniilor de celule precursor apare după 24 de ore. Unii hormoni neuro-endocrini (hormonul de creștere, prolactina) influențează direct sau indirect factorii de creștere hematopoietici.

Inhibitori ai creșterii celulelor hematopoietice sunt interferonii alfa, beta și gamma, prostaglandinele, factorul de necroză tumorală (TNF alfa) și unele chemokine. Familia de proteine TGF beta (factorul de creștere tumorală beta) are, de asemenea, o mare capacitate de reglare a hematopoiezii atât în sens activator, cât și în sens inhibitor.

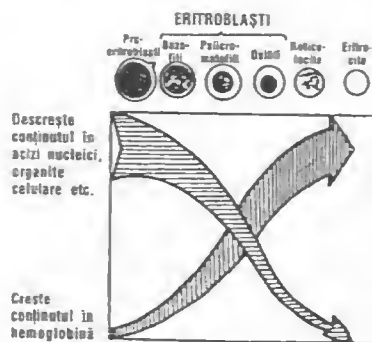


Fig. 5.13. Evoluția histo-chimică a precursorilor eritrocitari în cursul eritropoezei.

De fapt, hematopoieza este reglată de echilibrul existent între semnalele activatoare și, respectiv, inhibitorii ale creșterii celulelor hematopoietice. Rolul cel mai important în proliferarea liniei celulare eritrocitare revine eritropoietinei.

Menținerea echilibrului între elementele eritrocitare lansate în circulație și cele distruse se realizează prin mecanisme complexe nervoase și umorale de reglare. Excitatul fiziologic al autoreglării eritropoezei este nivelul presiunii parțiale a oxigenului de la nivelul țesuturilor. Când presiunea oxigenului scade, realizându-se hipoxia, apare poliglobulia ca urmare a lansării în circulație a unui număr mai mare de reticulocite de către eritropoietină.

Eritropoietina este o glicoproteină acidă hormonală, cu greutate moleculară de 34 000 de daltoni (34 kDa), alcătuită din 166 de aminoacizi. Gena care codează sinteza precursorului eritropoietinei este situată pe cromozomul Z. Sinteza are loc îndeosebi la nivelul celulelor granuloase ale aparatului juxtaglomerular renal (90%). În afara rinichiului, ficatul asigură 5-10% din secreția bazală a eritropoietinei mai ales în cursul vieții fetale și la nou-născut. Situri de legare specifică pentru eritropoietină se găsesc în tumori cerebrale umane, hemangiome și meningiome, alături de splină, placentă și glomusul carotidian (fig. 5.14).

Mecanismul de acțiune a eritropoietinei are la bază prezența unei proteine receptoare la suprafața eritroblastilor prevăzută cu proprietăți activante ale cuplului adenilat ciclază-cAMP-Ca²⁺. Un oarecare grad de activare a eritropoezei apare chiar de la stadiul de stimulare a celulelor sușe (primitive). Prin acest mecanism, eritropoietina exercită un efect mitogen, stimulând proliferarea și diferențierea progenitorilor eritroizi imaturi. Astfel, eritropoietina asigură ajustarea producției de eritrocite în funcție de necesitățile în oxigen ale organismului (valorile fiziologice serice variază între 6-30 mU/ml). În absența eritropoietinei, proeritroblaștii și eritroblaștii suferă un proces de moarte celulară programată (apoptoză). În condițiile anemiei acute apar concentrații crescute ale eritropoietinei plasmatică, în funcție de severitatea hipoxiei.

Biosinteza eritropoietinei are la bază efectul direct al deficitului de oxigen tisular asupra celulelor producătoare ale acesteia. Detecția presiunii oxigenului este realizată de către o hemoproteină de la suprafața celulelor producătoare de eritropoietină, cu rol de senzor al nivelului oxigenării tisulare (fig. 5.15).

Alături de mecanismul umoral și în strânsă legătură cu acesta este mecanismul nervos. Secționarea măduvei spinării în regiunea cervicală diminuează răspunsul eritrocitar la hipoxie, ca urmare a întreruperii legăturilor dintre centrii nervoși superiori și organele efectoare. Hipoxia tisulară ca stimul fiziologic al eritropoezei acționează fie direct asupra unor grupe neuronale centrale, fie indirect, prin intermediul receptorilor de la nivelul zonei sino-carotidiene și cardio-aortice.

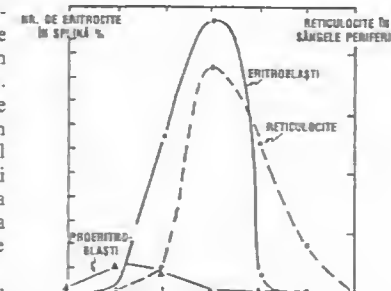


Fig. 5.14. Efectul eritropoietic al unei injectări unice de eritropoietină pe o splină de șoarece, inactivată din punct de vedere eritropoietic prin hipertransfuzie prealabilă (după Filmanovic, 1961).

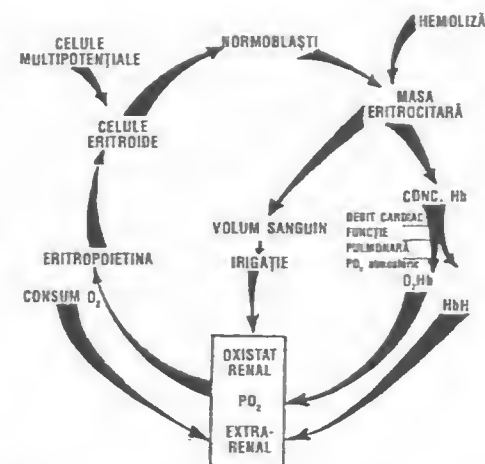


Fig. 5.15. Reglarea eritropoezei în funcție de necesarul de oxigen.

S-a demonstrat existența a două mecanisme realizabile în condiții de hipoxie. Primul este reflex și folosește drept cale aferentă chemoreceptorii sino-carotidieni și nervul Hering. În timp ce calea deferentă este reprezentată de măduva spinării și oervii simpatici. Centrii hipotalamusului posterior provoacă reticulocitoză, distrugerea acestuia atenuază reacția eritocitară la hipoxie.

Cel de-al doilea mecanism de răspuns la hipoxia cerebrală este neuro-nmoral. Spre deosebire de precedentul, acesta persistă după denervarea zonelor reflexogene, întrucât hipoxia excită și direct centrii vegetativi superiori.

Compoziția hematiel. Hematia conține:

- apă: reprezintă 60% din conținutul hematic;
- hemoglobină: formează 34% din reziduul hematic;
- lipide: reprezintă 0,7% din reziduul uscat, sau 5,1 mg/ml masă eritocitară. Din această categorie fac parte: fosfolipide – 2,98 mg, plasmalogen – 0,56 mg, colesterol – 1,20 mg și acizi grași – 2,01 mg/ml masă eritocitară;

- proteine: reprezintă 10% din reziduul uscat. Hematia conține, printre altele, 5–7 μmol aminoacizi liberi/ml, 4 μmol uree/ml, precum și cantități apreciabile de nucleotide;

- glucide: formează 0,5% din reziduul uscat, sunt reprezentate de glucoză – 3,7 μmol /ml și acid lactic 7,8 μmol /ml;

- săruri minerale: ating concentrația de 307 mEq%, din care Na^+ – 21 μmol /ml, K^+ – 155 μmol /ml, Cl^- – 78 μmol /ml, Ca^{++} – 2 μmol /ml etc.

5.2.6.4. Sinteza hemoglobinei

Prior rolul său de pigment respirator, hemoglobina reprezintă compusul ce asigură funcția majoră a eritrocitului – transportul de gaze. În condiții normale, concentrația pigmentului atinge valori de 16 g/dl sânge pentru bărbați și 14 g/dl la femei. Aceasta revine în medie la valori de 29 μg /hematie sau 34 g la 100 ml masă hematocică.

Din punct de vedere chimic, hemoglobina este o cromoproteină cu greutatea moleculară de 68 000. Molecula sa globulară este formată din patru subunități, fiecare cu Mr de 17 000. Fiecare unitate este formată dintr-o grupare prostetică, *hem*, fixată pe câte o grupare polipeptidică aparținând proteinei purtătoare, denumită *globină* (fig. 5.16).

Hemul joacă rol de grupare prostetică și pentru mioglobină, catalază, peroxidază, triptofan pirolază. Din punct de vedere chimic, este format dintr-un atom de fier (Fe^{2+}) fixat în centrul unui nucleu tetrapirolic – același ca pentru clorofilă și vitamina B_{12} . Pe acest nucleu se află substituite în poziția beta 8 reziduuri: 4 metil, 2 propionat și 2 vinil. Pirolii sunt legați între ei prin punți meten ($\text{C}-\text{CH}=\text{C}$). În felul acesta, se formează un sistem ciclic conjugat, în care legăturile duble asigură stabilitatea prin rezonanță a sistemului, determinând, de asemenea, și culoarea roșie.

În cazul oxihemoglobinei, absorbția spectrofotometrică are loc în lungimile de undă de 376 și 540 nm (secundare), banda principală fiind situată între 412 și 415 nm (banda principală Soret). Ionul de Fe^{2+} se fixează în planul nucleului prin patru legături de conjugare cu azotul pirolic. Perpendicular pe acest plan, deasupra și dedesubt se mai formează două legături, dintre care prima fixează Fe^{2+} de azotul rezidului histidinic al polipeptidului globinic corespunzător. A doua legătură, orientată în sens opus, rămâne liberă în cazul deoxihemoglobinei sau fixează oxigenul molecular în cazul oxihemoglobinei.

Sinteza hemului. Calea sintezei hemului (fig. 5.17) este relativ bine cunoscută în urma cercetărilor întreprinse în ultimii 35 de ani. Procesul se desfășoară în șapte etape succesive.

1. **Formarea succinil coenzimei A (SuccoA)** provine mai ales din ciclul Krebs.

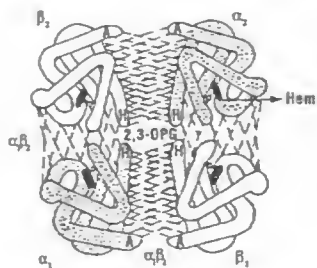


Fig. 5.16. Tetramerul de hemoglobină și legăturile necovalente dintre catene (după Vilcu, 1977).

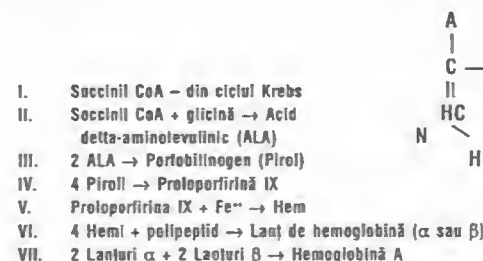


Fig. 5.17. Etapele sintezei hemului și hemoglobinei.

2. **Acidul delta-aminolevulinic (ALA)** se formează în prezența ALA sintetazei, cu participarea fierului ca activator. Plecând de la precursor (SuccoA), reacția trece printr-o etapă intermediară (acid alfa-amino-beta-cetoadipic) rapidă.

3. **Porfobilinogenul (PBG)** apare prin condensarea a două molecule ALA, formând nucleul pirol sub acțiunea ALA dehidrazei.

4. **Uroporfirinogenul (UPG)** reprezintă nucleul tetrapirolic al hemului. Apar trei izomeri, din care doar izomerul III este utilizat în continuare. Se formează din patru molecule de PBG sub acțiunea unei PBG dezaminaze. UPG în exces se elimină sub formă de uroporfirină urinară.

5. **Coproporfirinogenul (CPG)** apare prin procese de decarboxilare a UPG III. Excesul se elimină, de asemenea, urinar, sub formă de coproporfirină.

6. **Protoporfirin IX (PP IX)** reprezintă forma definitivă a nucleului tetrapirolic, format sub acțiunea unei oxidaze asupra CPG III.

7. **Insertia fierului în centrul PP IX** reprezintă etapa finală a sintezei. Se realizează cu participarea ferochelatazei.

Reglarea sintezei hemului. Sinteza hemului este o reacție unidirecțională, cu două trepte limitante, dintre care cea principală este sinteza acidului delta-aminolevulinic din SuccoA.

Treapta limitantă secundară a lanțului sintetic este etapa sintezei porfobilinogenului (PBG). Controlul vitezei de sinteză este realizat prin produsul final – hemol – care, acumulându-se, exercită efecte inhibitoare la nivelul ambelor trepte limitante. Mecanismul intim al acestui control are substrat genetic, cu participarea sistemului genă operatorie/genă reglatoare.

Sinteza globinei. Structura globinei a fost descrisă, în 1958, de Ingram și Schroeder. Proteina are o structură dimerică, fiind formată în condiții normale din două perechi de polipeptide. Se descriu două lanțuri alfa, cu câte 141 de aminoacizi, și două lanțuri beta, cu câte 146 de aminoacizi. Modificarea secvenței aminoacidice determină apariția lanțurilor de tip gamma (146 de aminoacizi, din care 37 diferiți față de tipul beta), delta (146 de aminoacizi, din care 10 diferiți) sau epsilon. După datele lui Perutz, proteina este dispusă spațial în alfa helix. Ea se caracterizează prin prezența legăturilor imidazol, în pozițiile 63 și 92.

Sinteza are loc la nivel ribozomal, unde se formează lanțurile polipeptidice alfa, beta, gamma și delta. Procesul este controlat de acizii nucleici pe căile obișnuite ale sintezei proteice. Lanțurile alfa și beta se dimerizează spontan. Cei doi dimeri (α_2 , β_2) formează, în prezența hemului, globina caracteristică hemoglobinei A, normală la adulți (fig. 5.18).

Alături de hemoglobina tip A, în care globina are formula dimerică $\alpha_2\beta_2$, s-au mai descris în condiții normale tipurile: A_1 , A_2 . Tipul A_2 are formula alfa, gamma, și apare la 2,5% din normali. Tipul A_3 apare la vârste înaintate și se pare că are lanțurile

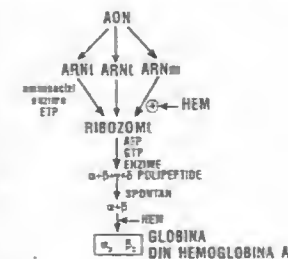


Fig. 5.18. Mecanismul sintezei globinei normale.

beta modificate. În cursul vieții intrauterine, hemoglobina este de tip diferit. S-au descris, astfel, o hemoglobină fetală și o hemoglobină embrionară, în hemoglobina fetală (HbF), globina are formula alfa₂ gamma₂. Ea formează 80% din hemoglobina ouă-ouăscutului și persistă doar în proporție de 1% la vârsta de un an, după care dispare. Pigmentul de acest tip are o capacitate crescută de stocare a oxigenului. Persistența sa, frecventă la rasa neagră, determină apariția talasemiei. În hemoglobina embrionară de tip U sau Gowers, formula globinei este alfa₂ epsilon₂.

Orice abatere de la structura normală a globinei determină formarea unor hemoglobine anormale ce stau la baza unei vaste patologii eritrocitare (hemoglobinopatii). S-a descris până în prezent un mare număr de hemoglobine anormale, din care peste 84 sunt bine definite.

În general, hemoglobinopatiile pot fi de două tipuri:

- hemoglobinopatii calitative: hemoglobinele din acest grup sunt anormale prin modificarea secvenței aminoacizilor într-un lanț normal. Acesta este cazul hemoglobinei de tip S, în care acidul glutamic este substituit cu valina. Boala este cunoscută sub numele de siclemie, sau drepanocitoză. O altă formă este hemoglobina C, în care acidul glutamic este substituit cu lizina;
- hemoglobinopatiile cantitative sunt determinate de absența totală a unui lanț polipeptidic normal (exemplu, talasemia tip beta).

5.2.6.5. Circuitul fierului în organism

Asigurând prin prezența sa unitatea și funcționalitatea moleculei de hemoglobină, fierul reprezintă un microelement esențial proceselor vitale. Cantitatea totală de fier din organism atinge valori de $4 \pm 0,5$ g.

Această cantitate se compartimentează astfel (fig. 5.19):

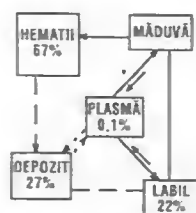


Fig. 5.19. Distribuția fierului în organism.

- fierul hemoglobinic reprezintă 67% din totalul fierului din organism ($2,5-3$ g). Hemoglobina coagulează cca $0,34$ g Fe^{2+} , iar 1 ml hematii conține 1 mg Fe^{2+} ;

- fierul de depozit reprezintă cca 27% din total (1 gram). Depozitarea se realizează sub două forme diferite: feritina și hemosiderina. Feritina este o combinație hidrosolubilă în care hidroxidul feros $[Fe(OH)_2]$ se fixează pe o proteică purtătoare (apoferritină). Hemosiderina este, de fapt, ferită parțial hidrolizată și prin aceasta insolubilă;

- fierul mioglobinic reprezintă 3,5% din total. În mioglobină, Fe^{2+} se află în jurul unei molecule de hem, înconjurat de o buclă formată din 150 de aminoacizi;

- compartimentul labil este reprezentat de Fe^{2+} aflat în curs de a traversa membrana normoblastilor. Cantitatea de Fe^{2+} aflată în acest compartiment este de $0,08$ g ($2,2\%$);

- fierul din enzimele oxidative asigură desfășurarea activității acestora și reprezintă $0,2\%$ din total, sau $0,008$ g;

- fierul plasmatic este forma mobilă a fierului care, având un *turnover* de 24 de ore, reprezintă forma de deplasare a fierului de la zonele de absorbție spre cele de depozitare, utilizare, excreție. În plasmă, fierul circulează sub formă de Fe^{3+} fixat pe transferrină. Aceasta este o beta-globulină alungită, cu greutatea moleculară de 80 000. La cele două extremități se fixează resturile glicoproteice globulare ce captează Fe^{3+} . În 100 ml ser sanguin se găsesc 200 mg apoferritină, conținând $100 \mu g$ de Fe^{3+} . Apoferritina există în 90 de variante moleculare diferite, determinate genetic.

Necesitățile legate de utilizarea fierului la oivel de măduvă hematogenă și alte țesuturi determină o permanență circulației a fierului în organism. Acest circuit se desfășoară în etape succesive, prezentate în continuare.

Absorbția fierului. Necesarul minim de fier variază în funcție de vârstă, sex și stare fiziologică: sugari - 10 mg/24 h; copii - 5 mg/24 h; femei tinere - 20 mg/24 h; femei gravide - 30 mg/24 h; femei după menopauză - 10 mg/24 h; bărbați - 10 mg/24 h (fig. 5.20).

Aceste cantități de fier sunt furnizate prin alimente. Un regim alimentar obișnuit aduce un aport de $10-20$ mg/24 h. Pregătirea alimentelor în vase de fier poate aduce un mic surplus. În alimente, fierul apare

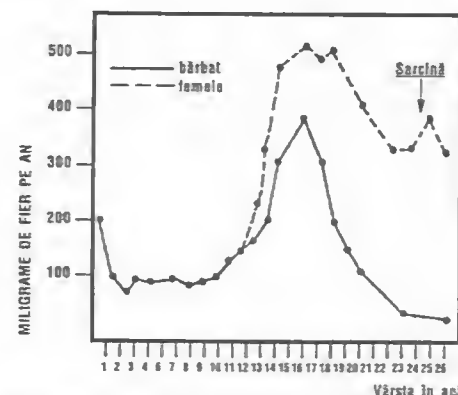


Fig. 5.20. Nevoile anuale de fier după vârstă și sex (după Wintrobe, 1961).

sub formă de săruri, complexe aminoacidice și compuși de bism. Absorbția fierului din alimente se desfășoară la oivel de intestin subțire, fiind maximă la nivelul mucoasei duodenale. Ea se realizează prin transport activ. Fierul trivalent din alimente este redus în formă bivalentă și apoi transportat prin membrana celulei intestinale. În interiorul celulei are loc oxidarea Fe^{2+} din nou în Fe^{3+} . O bună parte din acest fier se combină reversibil cu apoferritină, produsă de ribozomii celulei intestinale, formând feritina și rămânând depozitată în celulă. În funcție de necesitățile organismului, feritina se poate desface, eliberând Fe^{2+} , care trece în circulație, formând transferrina circulantă. Excesul de transferrină neutilizată în circulație poate fi captat de celula intestinală, care îl depozitează (fig. 5.21).

Compușii de bism aflați în alimente fie sunt trecuți ca atare din tubul digestiv în circulație, fie sunt în prealabil degradați, eliberând Fe^{2+} , care este captat de celula intestinală.

Absorbția fierului este modulată prin intervenția a o serie de factori. Dintre aceștia mai importanți sunt:

- conținutul în Fe^{2+} al organismului: supraîncărcarea cu Fe^{2+} împiedică evacuarea în sânge a metalului absorbit și fixat sub formă de feritina în celula intestinală. Eliminarea excesului creat are loc prin

procesul de descumare a epitelului intestinal. Excesul de fier plasmatic trece în celula intestinală, unde se fixează. O ultimă cale de purjare a organismului în aceste condiții este reprezentată și de trecerea macrofagelor încărcate cu fier din țesutul interstițial în lumenul intestinal. În condițiile unui deficit de fier, celula intestinală nu mai reține depozite de ferită și are loc trecerea rapidă din intestin în torrentul circulator;

- secreția gastrică favorizează absorbția fierului, reducându-l din forma trivalentă în cea bivalentă. S-a descris în secreția gastrică și prezența unui compus activ, denumit gastroferritină, care ar reduce absorbția fierului. Ar exista și un compus cu rol de activare a absorbției, dar a cărui natură nu este precizată;

- funcția hepatică și cea pancreatică joacă un rol în absorbția fierului având în vedere că unele afecțiuni cronice la acest nivel măresc absorbția. Secreția biliară acționează în același sens activator;

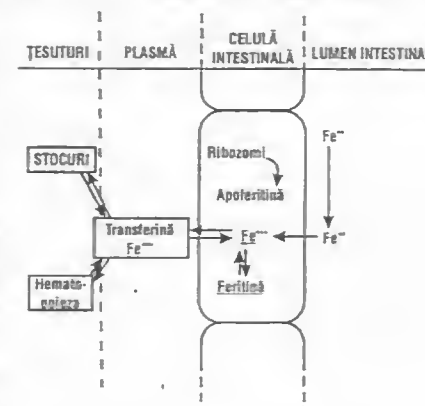


Fig. 5.21. Absorbția intestinală a fierului.

- **compoziția alimentelor:** regimurile alimentare bogate în oxalați, fitați, fosfați reduc absorbția fierului prin formarea de complexe inerte. Dimpotrivă, alimentele bogate în vitamină C, lactat sau piruvat, favorizează absorbția prin acțiunea lor reducătoare. Cantitățile moderate de alcool determină îmbunătățirea absorbției prin activarea secreției gastrice;

- **hipoxia tisulară și anemia** măresc și ele absorbția fierului printr-un mecanism încă neprecizat.

Transportul fierului. Circulația fierului în organism (fig. 5.22) poate fi considerată un sistem închis, în care pierderile de fier prin eliminare sunt reduse la minimum. Odată absorbit, un ion de Fe^{2+} poate circula

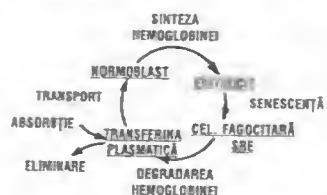


Fig. 5.22. Circuitul fierului în organism (schematic).

câteva luni înainte de a fi eliminat. Această circulație începe la nivel de absorbție de unde, sub formă de transferină, fierul este transportat în măduva roșie. Aici, el este preluat de normoblasti, în vederea sintezei de hemoglobină. Fixat ulterior în eritrocitul adult, Fe^{2+} circulează până în momentul hemolizei, când hemoglobina este captată de celulele fagocitare ale reticulului endotelial. Prin degradarea pigmentului, Fe^{2+} este redat plasmii sub formă de transferină reutilizabilă (fig. 5.23). Cedarea fierului din transferină are loc prin fixarea temporară a proteinei purtătoare pe normoblast. După aceasta, transferina revine în plasmă gata pentru reutilizare. Până și reticulocitul, în care sinteza hemoglobinei este aproape completă, rămâne încă apt să fixeze 25 000–50 000 de molecule de transferină/minut. Absența congenitală a proteinei

poate determina o anemie feriprivă. Există și părerea că transferina ar ceda fierul celulei centrale a insulei normoblastice, care îl transformă în feritină. Ulterior, normoblaștii „sugari” ar prelua fierul cedat de celula centrală, prin rafeocitoză.

Fixarea și utilizarea fierului în normoblaști.

Normoblastul reprezintă etapa următoare în circuitul fierului din organism. Ajuns în normoblast, fie sub formă de feritină cedată de celula reticulară, fie din transferina plasmatică, fierul este depozitat sub formă de feritină. La nivelul mitocondriilor, feritina este scindată, eliberând ionii de Fe^{2+} necesari sintezei de hemoglobină.

Sistemul reticulo-endotelial. Macrofagele acestui sistem repun în circulație Fe^{2+} din hemul degradat. Din acest fier, 40% reapar în hematii la 12 zile după hemoliză, iar la 120 de zile reapar 60% din rest. Restul de 40% este stocat în macrofage pentru perioade depășind 140 de zile.

Excreția fierului. Eficacitatea sistemului de conservare nu permite în 24 de ore eliminarea unei cantități de fier mai

mare de 10% din conținutul total al organismului. Dintre căile de eliminare, cea mai importantă este cea digestivă. Prin materiile fecale se pierde zilnic cca 1 mg de fier, cantități mai reduse se pierd prin exfolierea pielii și urină. Lactația, atunci când se produce, determină pierderi de cca 1 mg/zi. Eliminări au loc și prin hemoragiile menstruale.

5.2.6.6. Factori cu rol catalitic în sinteza hemoglobinei

Alături de Fe^{2+} , care îndeplinește rol catalitic și de substrat, sinteza normală a hemoglobinei necesită și prezența unui număr de factori cu rol stimulator, catalitic. Dintre acești factori mai importanți sunt:

- **cuprul:** organismul necesită zilnic cca 2 mg Cu, în vederea absorbției fierului, pentru întreținerea viabilității hematiilor și desfășurarea normală a funcției hematopoietice;

- **cobaltul:** deprivarea de Co, observată la om în unele zone din Noua Zeelandă, determină avitaminoza B_{12} și anemia consecutivă;

- **nichețul:** în calitate de inhibitor al fermenților respiratori, Ni induce stări de ușoară anxietate celulară, necesare pentru a stimula secreția bazală de eritropoietină în vederea unei hematopoieze active. Se pare că și Cu ar acționa parțial în această direcție;

- **acidul clorhidric gastric:** acționează indirect prin reducerea Fe^{3+} în Fe^{2+} ;

- **acidul folic:** cunoscut și sub numele de factor antianemic extrinsec, se află în alimente sub formă conjugată. Decnjugarea sa are loc în momentul absorbției intestinale. La nivel de țesuturi, acidul folic este redus succesiv, în prezența vitaminei C și a homocisteinei, la acid dihidrofolic și apoi acid tetrahidrofolic, din care se formează acidul folic, ce reprezintă forma finală, activă. Acidul folic intervine în sinteza purinelor (mai ales ADN), precum și în sinteza histidinei. În acest mod s-ar produce participarea acidului folic în procesul de maturare. Absența sa ar determina apariția anemiilor megaloblastice;

- **vitamina B_{12} :** denumită și factor antianemic extrinsec Castle sau ciancobalamina, vitamina este necesară în cantități de 1 $\mu g/24$ de ore. Absorbția vitaminei are loc la nivelul receptorilor specifici din ileonul inferior. La acest nivel, vitamina străbate mucoasa doar dacă se combină în prealabil cu o mucoproteină de origine gastrică, numită factor antianemic intrinsec Castle. Deficitele de absorbție apar în anaclohidrii, gastrectomii, botrioceluloză etc. Ajunsă în sânge, ciancobalamina circulează fixată pe o globină transportare. La nivel de țesuturi, ea acționează stimulând sinteza de novo a grupărilor metil, metabolizarea acidului folic în acid folic, sinteza ADN și ARN. Deficitul determină degenerări în sistemul nervos și defecte de maturare în seria eritocitară, cu apariția unor megaloblaști și anemie consecutivă;

- **vitaminele C, PP, B_6** reprezintă factorii necesari proceselor de hematopoieză și activității enzimelor din eritrocitul adult.

5.2.6.7. Funcțiile membranei eritrocitare și ale eritrocitului

Funcțiile sintetice și metabolice ale hematiei depind de integritatea funcțiilor membranei eritrocitare. Dintre aceste funcții mai importante sunt:

- **permeabilitatea selectivă:** membrana hematice poate fi traversată de apă, CO_2 , anioni mici (Cl^- , PO_4^{3-} , CO_3^{2-}), H^+ , uree și glucoză. Ea este impermeabilă la proteine și intermediari metabolici fosforilați. Încărcarea electropozitivă a porilor membranei nu îngăduie trecerea cationilor (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}). Schimburile ionice sunt asigurate prin mecanisme de transport activ;

- **rezistența globulară:** datorită permeabilității selective a membranei sale, hematia se comportă ca un osmometru foarte sensibil. Orice creștere a presiunii osmotice a mediului determină ieșirea apei și contractă hematia. Scăderile presiunii osmotice determină acumularea de apă și turgescența hematiei. Membrana hematice are o rezistență deosebită la aceste variații de volum. Investigarea acestei rezistențe globale prin diferite metode aduce importante informații privind capacitatea funcțională a hematiei. În mod obișnuit se utilizează testul rezistenței osmotice globale, în cursul căruia se determină concentrația la care începe hemoliza unei suspensii de hematii (rezistența globulară minimă = 0,48 g%) și concentrația la care hemoliza este totală (rezistența globulară maximă = 0,28–0,33 g%). În condițiile în care rezistența globulară scade mult (sferocitoza ereditară), hemoliza începe și devine totală la concentrații mult crescute;

- **funcția metabolică:** la nivelul membranei hematice au loc procese esențiale pentru regenerarea și energetică sa, cum ar fi, de exemplu, fosforilarea ADP sau sinteza unor lipide.

Funcția de transport a eritrocitului: prin hemoglobina conținută, eritrocitul transportă O_2 , necesar și o parte din bioxidul de carbon rezultat din arderile tisulare. Oxigenul este transportat sub formă de oxihemoglobină. Un gram de hemoglobină poate fixa 1,34 cm^3 oxigen. Cele 16 grame de hemoglobină conținute în 100 cm^3 sânge pot transporta 20,5 cm^3 oxigen. Bioxidul de carbon este transportat sub forma carboximatului de hemoglobină. Intoxicațiile cu substanțe oxidante (nitriți, nitrați) sau CO afectează această capacitate de transport, determinând apariția unor compuși stabili ai hemoglobinei cu oxigenul atomic (methemoglobina) sau oxidul de carbon (carboxihemoglobina) (vezi capitolul de fiziologie a respirației).

5.2.6.8. Degradarea eritrocitelor. Hemoliza fiziologică

Așa cum s-a mai menționat, durata de viață a hematiilor este de cca 120 de zile. Această valoare a fost determinată cu ajutorul hematiilor marcate izotopic cu ^{51}Cr , ^{32}P , ^3H .

Distrugerea hematiilor sau hemoliza fiziologică se desfășoară la trei niveluri: în splină, în ficat și în circulația generală.

Splina este sediul procesului de eritocaterază. Organul este un sistem de sechestrare vasculară a hematiilor modificate. Sistemul este extrem de sensibil, permițând fixarea hematiilor cu modificări minime. Din arteriolele mici, hematiile trec în zona marginală, formată din pulpa albă. Celulele reticulo-endoteliale de la acest nivel formează un filtru mecanic care încetinește progresia hematiilor lezate. Întrând apoi în pulpa roșie, majoritatea hematiilor trece prin vasele sinusale căptușite cu celule macrofage. O mică parte (1–2%) trece prin sistemul cordal, format din capilare înguste (3 μm diametru) care comunică cu sinusurile prin discontinuități ale membranei bazale. Consecința acestor particularități structurale este faptul că, în splină, hematiile circulă extrem de lent. Pentru cele modificate, staționarea este foarte îndelungată, ele fiind practic sechestrate. Prin procesul de îmbătrânire, hematia suferă o serie de modificări, dintre care mai importante sunt creșterea consumului de oxigen, reducerea proceselor de glicoliză și un proces de deshidratare prin pierderea potasiului intracelular. Deshidratarea determină scăderea plasticității și favorizează în consecință sechestrarea. În aceste condiții, hematiile sunt expuse unui mediu cu pH scăzut și cu cantități reduse de glucoză. Nutriția și viabilitatea celulei sunt alterate și prin fenomenul de spumare a plasmiei, a cărei vâscozitate este crescută. Toate aceste condiții determină distrugerea celulelor fragilizate prin îmbătrânire și permite eliberarea lor de către macrofage.

Procesele de hemoliză splenică sunt influențate și de activitatea unor factori umorali secretați la acest nivel. S-a descris astfel o hemolizină (lizolecitină), care participă la distrugerea membranei hematice. Ungar a descris prezența a două splenine: splenina A – cu rol în creșterea rezistenței globulare, și splenina B – cu efect hemolizant.

Ficatul este capabil să distrugă doar hematiile cu vicii evidente de conformație. Totuși, rolul său în hemoliză este extrem de important, datorită faptului că din sângele debitat de inimă 55% trec prin ficat, în timp ce numai 5% prin filtrul splenic.

Circulația generală: unele hematii fragilizate și extrem de deformate prin îmbătrânire pot fi distruse și în momentul trecerii prin diverse pături capilare, ca urmare a acțiunii forțelor hidrodinamice ce pot depăși capacitatea de rezistență globulară.

Pigmentul eliberat din hematiile distruse este captat de celulele macrofage ale sistemului reticuloendotelial. Hemoglobina se transformă în coeglobină, care, prin pierderea Fe^{2+} , trece în biliverdin-globină (fig. 5.24). Pierzând globina, aceasta se transformă în biliverdină, care este redusă apoi în biliverdină prehepatică.

La nivelul ficatului, acestea suferă un proces de glucuronosare sau, eventual, sulfoconjugare, fiind transformată în bilirubină hepatică, care stă la originea pigmentilor biliari (pentru detalii vezi și capitolul de fiziologie digestivă).

Hemoliza este favorizată și declanșată de prezența unor anomalii ale membranei, ale hemoglobinei, precum și de acțiunea unor factori fizici extrinseci.

Anomaliile membranei eritrocitare: din această categorie fac parte:

- alterările de formă și plasticitate deja discutate în cele de mai sus;

- modificările de permeabilitate pentru cationi, care pot apărea, de exemplu, în lipsa glucozei; ele

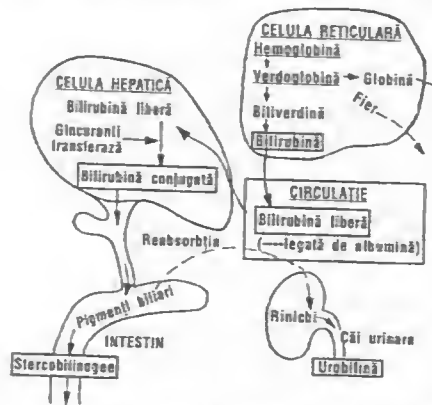


Fig. 5.24 Ciclul producerii de degradare a hemului [după Bernard și colab., 1971 (modificată de Vlăcu, 1977)].

determină fenomene de eritroconcentrare, acumulări de Na intracelular și scăderea plasticității, care favorizează sechestrarea și distrugerea;

- fixarea unor proteine serice pe suprafața eritrocitelor poate determina aglutinarea și hemoliza lor. Dintre aceste proteine fac parte: factorii sistemului complement, aglutininele, anticorpii incompleți;

- modificarea compoziției chimice a membranei eritrocitare reprezintă, de asemenea, un factor de scădere a rezistenței globulare. Din această categorie fac parte, de exemplu: blocarea grupărilor SH^- sau alterările lipidice determinate de expunerea la acțiunea peroxidazei sau a unor substanțe liposolubile (unele antibiotice).

Anomaliile hemoglobinei: plasticitatea și rezistența globulară pot fi alterate prin prezența unor hemoglobine anormale. Astfel, hemoglobina S din siclemie mărește vâscozitatea conținutului hematice. Corpusculii Heinz formați din hemoglobină precipitată reduc, de asemenea, plasticitatea hematice.

Factori fizici extrinseci: traumatismele extravasculare, defectele și protezele valvulare cardiace, arteriopatiile, depunerea difuză de fibrină pe pereții vasculari reprezintă tot atâția factori de traumatizare globulară, putând determina hemoliza la locul de acțiune.

5.2.6.9. Grupele sanguine. Transfuzia

Gravitatea cu totul deosebită a pierderilor de sânge total sau de elemente figurate în hemoragii, anemii, leucopenii, intoxicații cu solvenți organici sau boli de iradiere determină utilizarea, ca mijloc eficace de compensare, a transfuziei de sânge.

Încă de la primele încercări de a introduce sânge de la un donator uman în circulația unui primitiv au apărut eșecuri, cunoscute și sub numele de accidente posttransfuzionale.

Imediat după administrarea transfuziei, apărea adesea un ansamblu de fenomene de o gravitate excepțională, reprezentate de frison termic, transpirații, vărsături, stări de colaps, anxietate și, foarte frecvent, blocaj renal.

Acest complex simptomatic, cunoscut și sub numele de *șoc hemolitic*, era determinat de aglutinarea intravasculară a hematiilor, urmată de hemoliză. După o eventuală remisiune, la un interval oarecare, apăreau așa-zisele *accidente posttransfuzionale tardive*, manifestate prin insuficiență renală de diverse tipuri și gravități.

Cercetând cauzele aglutinării intravasculare a hematiilor, Landsteiner (1901) descrie pentru prima oară grupele sanguine, considerând incompatibilitatea de grup sanguin ca fiind cauza principală a accidentului posttransfuzional. El pune în evidență existența pe hematiile speciei umane a două tipuri de polizaharide cu proprietăți antigenice, numite aglutinogene A și B, cărora le corespund niște anticorpi plasmatici specifici – aglutininele alfa și beta. Prezența acestor antigene hematice și anticorpi plasmatici în sângele fiecărui individ este determinată genetic. Astfel încât, la același individ nu pot coexista simultan aglutinogenul și aglutinina specifică (legea excluderii reciproce). Fără a mai intra în detaliile transmiterii genetice a acestor factori, trebuie spus că, în funcție de conținutul în aglutinogen și aglutinine, oamenii se împart în patru grupe:

- **grupa I sau 0** nu conține aglutinogene A și B, conține aglutinine alfa și beta. Antigenul 0 fixat pe hematiile acestei grupe nu are decât o antigenitate redusă. Dintre persoanele de rasă albă, 47% aparțin acestei grupe;

- **grupa II-A** conține aglutinogen A și aglutinina beta, reprezentând 41% din total;

- **grupa III-B** reprezintă 9% din total, se caracterizează prin prezența aglutinogenului B și a aglutininei alfa;

- **grupa IV-AB** reprezintă 9% din total și se caracterizează prin prezența ambelor aglutinogene (A și B) și absența aglutininei plasmatice.

În cadrul sistemului AB0 există și subgrupe determinate fie de prezența unor variante de aglutinogen, fie de prezența unor variante de aglutinine. Se descriu astfel trei tipuri de aglutinogen A (A_1 – 80%, A_2 – 20%, A_3 – 1%) și două tipuri de aglutinine alfa (α_1 și α_2). Aglutinogenele A și B sunt, din punct de vedere chimic, glicoproteine și apar la făt începând din luna a III-a de sarcină. Aglutininele alfa și beta încep să se formeze la 3–5 luni după naștere, concentrația lor crește până în jur de 5–10 ani și apoi scade

către vârsta de 60–70 de ani. Din punct de vedere imunologic, sunt anticorpi bivalenți, cu funcție simultană de aglutinare și hemoliză.

Determinarea grupelor sanguine se efectuează cu ajutorul serurilor hemotest A, B și O în tuburi (metoda Monly-Mosso), fie pe lame (metoda Beth-Vincent). În aceste determinări pot apărea și erori, datorate fie ciurii tardive (peste 2–3 minute), fie nerespectării proporției de diluție (1/10) sau prezenței unor pseudoaglutinări (hiperfibrinogenemie, boli infecțioase, stări febrile etc.). Cunoașterea grupelor sanguine și determinarea compatibilității dintre sângele donatorului și cel al primitorului este actul de bază în orice transfuzie. Din acest punct de vedere, criteriile de compatibilitate diferă.

În cazul *transfuziilor mici*, sub 500 cm³ (sub 1/10 din volumul sanguin al primitorului), aglutininele donatorului se diluează în proporție de peste 1/10, fapt ce determină pierderea activității acestora. În aceste situații, prezente de fapt în majoritatea transfuziilor, ceea ce contează în determinarea compatibilității este aglutinogenul donatorului. Acest fapt este exprimat clar în schema Ottenberg de compatibilitate transfuzională. După această schemă, indivizii grupei OI sunt considerați donatori universali, în timp ce aceia din grupa AB sunt primitori universali.

În cazul *transfuziilor mari*, depășind 500 cm³, schema Ottenberg nu mai este valabilă, iar transfuziile se administrează exclusiv izogrup.

În afara sistemului antigenic AB0, s-a mai descris pe hematii și alte sisteme antigenice, cum ar fi, de exemplu, sistemele M, N, P.S.s., Kelly, Lewis, Dnffy. Aceste antigene sunt de obicei prezente la hematiiile grupei OI. Ele se caracterizează prin antigenitate redusă și sunt utilizate la identificări de sânge și stabiliri de paternitate în medicina judiciară. S-a observat că, uneori, chiar în cadrul compatibilității de sistem AB0, pot apărea, la indivizi ce primesc transfuzii repetate, accidente posttransfuzionale. Acest fapt a fost explicat de Landsteiner, care, în 1937, descoperă pe hematiiile de maimuță *Macacus Rhesus* un antigen denumit Rh, localizat ulterior și în sângele uman sub numele de *sistem Rh-Hr*.

Este vorba de un antigen hematic descris în opt variante, care se moștenește exclusiv de la tată. Anticorpii anti-Rh (aglutinine) nu sunt determinați genetic, ci apar în cursul vieții prin imunogeneza tipică la indivizii Rh-negativi, în urma unor transfuzii repetate sau după hemoterapie cu sânge Rh-pozitiv. Prezența acestui sistem determină apariția de accidente posttransfuzionale. La mame Rh-negative, dezvoltarea unui făt Rh-pozitiv (tată Rh-pozitiv) determină producerea de anticorpi circulanți anti-Rh. Ritmul lent de producere a acestor anticorpi și posibilitățile reduse de contact pre-partum între hematiiile fătului și circulația maternă fac ca prima sarcină să decurgă normal. La a doua sarcină și la cele următoare apar însă accidente de incompatibilitate extrem de variate, mergând de la avort precoce până la icter hemolitic, cu eritroblastoză a nou-născutului și icter nuclear.

Desensibilizarea prealabilă a mamei, cezariana precoce și tratarea fătului prin exsanguinotransfuzie reprezintă mijloacele cele mai frecvent utilizate de combatere a acestor accidente.

Determinarea grupei Rh se realizează cu ajutorul serului anti-Rh. În rândul persoanelor Rh-pozitive, Wiener a descris opt subgrupe, datorate existenței unor variante antigenice, dintre care cele mai importante sunt: subgrupa Rh₀ (85%), Rh₁, Rh₂, Rh₃ – fiecare dintre ele capabile să determine apariția unor anticorpi specifici.

La persoanele Rh-negative s-a descris prezența unui antigen Hr. Există 14 grupe Hr. S-au descris și unele accidente rarissime, explicabile prin incompatibilitatea în cadrul acestui sistem.

5.2.7. LEUCOCITELE

Leucocitele sunt, în general, celulele circulante implicate în apărarea organismului și care, aflându-se în sânge și în limfă, nu conțin hemoglobină.

În sângele adulților se află 6 000–8 000 leucocite/mm³. În ultimii ani, aceste valori prezintă o tendință la scădere. În sângele nou-născuților există 12 000–20 000 leucocite/mm³, iar la sugari 9 000–12 000/mm³. Aceste valori pot varia în diferite condiții fiziologice și patologice.

Creșteri (leucocitoze) fiziologice apar în sarcină, efort fizic, frig, digestie, emoții și alte stări de predominanță a sistemului vegetativ simpatic. Leucocitozele patologice apar în stările infecțioase acute, subacute sau cronice, leucemii, hemoragii, diabet, neoplasme, febră la pirogeni și diverse alergii.

Scăderea numărului de leucocite circulante (leucopenia) poate apărea la persoane vârstnice. Leucopenii patologice apar în bolile infecțioase anergizante (febră tifoidă, gripală, rujeolă, parotidită epidemică, malarie), în aplaziile medulare prin iradiere sau intoxicație (benzen, piramidon) sau în stresul emoțional. Aceste valori globale, obținute prin numărători, au doar o semnificație orientativă. Leucocitele sunt o populație celulară extrem de diversificată morfologic și funcțional. Examinarea microscopică a sângelui a permis diferențierea diferitelor tipuri de leucocite, a căror clasificare morfo-funcțională mai poartă și numele de *formulă leucocitară*.

După aspectul nucleului, leucocitele se clasifică în mononucleare și polinucleare. Primele se mai numesc și agranulocite, spre deosebire de polinuclearele granulocitare, a căror citoplasmă conține numeroase granulații acide, bazofile sau eozinofile.

Agranulocitele mononucleare formează 32,5% din totalul leucocitelor. Ele sunt reprezentate de limfocite (25,5%) – celule în general mici (7–10 μm), și de monocite (5%) – celule mari (16–20 μm diametru). Apariția granulațiilor în citoplasmă acestora reprezintă un semn de îmbătrânire.

Granulocitele polinucleare formează 67,5% din totalul leucocitelor. Denumirea lor este justificată de prezența nucleului polilobat. După afinitățile tinctoriale ale granulelor, polinuclearele pot fi neutrofile (65%), eozinofile (2%) și bazofile (0,5%). Dimensiunile lor variază în jur de 10–15 μm diametru. Este de subliniat faptul că, după datele actuale, leucocitele circulante nu reprezintă decât un compartiment cu semnificație funcțională redusă. În cursul vieții lor, aceste celule extrem de diferențiate parcurg un circuit de la măduvă spre sânge și, de aici, în țesuturi, unde își îndeplinesc funcția de bază. Caracteristicile funcționale ale acestui circuit vor fi prezentate pentru fiecare categorie de leucocite în parte.

5.2.7.1. Granulocitele

Procesul de formare și maturare a granulocitelor, care se desfășoară în bună parte la nivelul măduvei hematogene, se numește *granulopoieză*. Celulele ce formează seria granulocitară sunt, în ordinea apariției lor succesive, următoarele:

1. *celula primordiale* este aceeași celulă stem, ca și în cazul eritropoezei. Inițial multipotențială, ea suferă o deviere lencoidă, transformându-se într-o celulă multipotențială, capabilă să genereze doar elementele seriei albe (vezi și capitola precedent);
2. *mieloblastul*, care în decursul primelor 24 de ore de viață suferă prima diviziune a seriei;
3. *promielocitul*, rezultat al primei diviziuni; celula trece prin a doua diviziune a seriei;
4. *mielocitul* apare în urma diviziunii precedente și conține granulațiile specifice (neutrofile, eozinofile sau bazofile). Celula intră rapid în diviziunea a treia;
5. *metamielocitul*, rezultat din diviziunea precedentă; această celulă nu se mai divide, seria continuându-se prin maturare treptată;
6. *granulocitul tânăr nesegmentat* apare prin maturarea metamielocitelor și are un nucleu alungit, pliat, cu condensări;
7. *granulocitul adult* reprezintă forma matură, circulantă, a seriei granulocitare. Este o celulă cu diametrul uniform de 12–15 μm. Nucleul său este segmentat în 3–5 lobi. Gradul de maturitate a celulei poate fi apreciat pe baza acestui criteriu. În laboratorul clinic de hematologie s-a utilizat și se mai utilizează încă formula Arneth, care reprezintă o astfel de clasificare procentuală a granulocitelor în 20 de categorii, după segmentarea nucleului. Devierile spre stânga ale acestei formule au semnificația unei predominanțe a leucocitelor tinere, puțin segmentate (activitate granulopoietică intensă). Devierile spre dreapta trădează procesele de îmbătrânire a seriei.

Citoplasma conține granulații neutrofile, eozinofile sau bazofile, caracteristice. Granulațiile neutrofile conțin fosfatază alcalină, peroxidază, dezoxiribonuclează, glicogen și lipide. Se colorează în albastru violet. Granulațiile eozinofile, în număr de cca 20, au un pH de 11 și o structură cristaloidă (rețea de filamente paralele). Ele sunt formate din peroxidază, aminoacizi bazici (lizină, arginină), fosfolipide și mucopolizaharide sulfonate. Granulațiile bazofile sunt plachete lamelare, hidrosolubile, cu pH acid. Ele sunt formate din acid hialuronic, glucide, aminoacizi acizi, heparină și amine de tipul histaminei.

Forma granulocitelor este extrem de variabilă datorită excepționalei lor mobilități. Ele se află în continuă deplasare. Celula emite pseudopode în direcția de deplasare. Luându-le ca punct fix, citoplasma se deplasează în aceeași direcție, nucleul rămânând ultimul care urmează mișcarea.

Cinetica granulopoiezei. Așa cum s-a menționat mai sus, granulocitele pot fi privite ca reprezentând o populație celulară unică, care, prin diviziune și maturare, progresează dinspre măduva hematogenă spre sângele circulant și, de aici, spre țesuturi, unde își realizează funcția și este distrusă.

Așa cum se poate observa și din schema alăturată (fig. 5.25), acest proces este format din următoarele componente:

- **componenta granulopoietică**, reprezentată de celulele medulare care prin trei mitoze trec, în decurs de 4 zile, prin stadiile succesive de mieloblaști, promielocite și metamielocite. Aceste celule formează așa-zisul „pool mitotic“;

- **componenta de maturare**, reprezentată de metamielocite care, în decurs de 5 zile, devin mature, trecând succesiv, la nivelul măduvei, de la formele de granulocit tânăr nesegmentat, la cele de granulocit adult, segmentat. Aceste forme sunt considerate ca reprezentând și o etapă de stocare a granulocitelor;

- **componenta sanguină**, reprezentată de granulocitele adulte care trec în sânge, unde circulă cel mult o zi. La acest nivel, celulele granulocitare se repartizează în două compartimente: circulant (antrenate în torentul circulator) și marginal (granulocitele fixate pe peretele capilar și care, relativ imobile, sunt gata de o intervenție locală imediată);

- **componenta tisulară**: din durata totală a vieții (cca 15 zile), granulocitele adulte circulă o zi în sânge, apoi are loc trecerea lor în țesuturi. La acest nivel, ele își îndeplinesc funcția timp de 4-5 zile, după care sunt distruse.

Reglarea granulopoiezei. Cercetarea mecanismelor de control ale granulopoiezei este dificilă *in vivo*, datorită faptului că granulocitele circulante, ușor de urmărit și cuantificat, formează un compartiment cu semnificație redusă pentru capacitatea și vitalitatea întregului sistem. Pe de altă parte, granulocitele medulare și tisulare sunt dificil de cuantificat. Datorită acestui fapt, mecanismele implicate în controlul

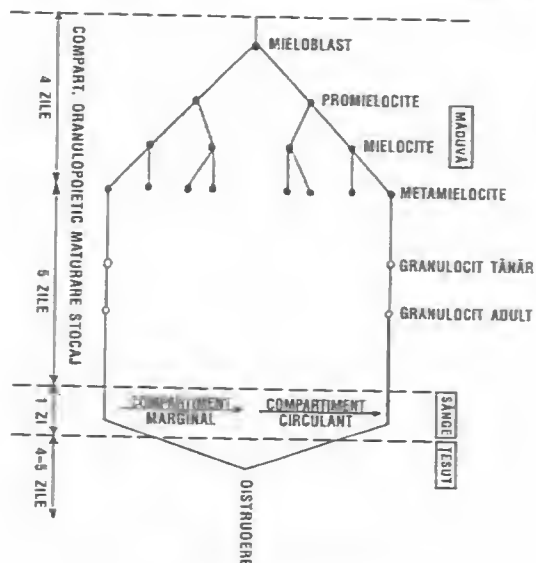


Fig. 5.25. Cinetica granulopoiezei.

granulopoiezei conțin încă numeroase elemente ipotetice. Se discută existența unor mecanisme umorale locale și a unor mecanisme neuro-endocrine generale.

Ipotezele umorale au la bază următorii factori:

- **granulopoietina tisulară**. Existența unui factor umoral cu acțiune similară eritropoietinei a fost postulată datorită experimentelor pe animale cu leucofereză. Plasma acestora, la care s-a realizat îndepărtarea leucocitelor circulante, determină leucocitoză la animalele normale prin accelerarea maturării celulelor primare. Factorul cauzal, denumit leucopoietină, nu a putut fi încă izolat și identificat;

- **sistemul factorilor granulocitari**. Se consideră astăzi că granulocitele mature sunt capabile să regleze granulopoieza prin producerea unor factori inhibitori sau inductori. Factorii inhibitori ar bloca sinteza ADN și mitozele la nivelul mielocitelor. Factorii inductori ar reacționa accelerând eliberarea în circulație a leucocitelor medulare stocate;

- se discută prezența și mecanismul de acțiune a **sistemului chalon - antichalon**. Ambii factori ar fi produși de granulocitul matur. Chalonul are o specificitate redusă. Substanța, a cărei producere este stimulată prin leucofereză și blocată de leucotransfuzie, acționează blocând atât granulopoieza, cât și dezvoltarea altor serii leucocitare. Antichalonul ar acționa stimulând specific producerea ADN mielocitar. Sistemul se pare că este de fapt format din două grupe de factori.

Scăderea numărului de granulocite adulte ar favoriza producerea și activarea factorului de tip antichalon, în timp ce leucocitoza ar favoriza activitatea factorului de tip chalon. În principiu, mecanismul ar putea acționa și în reglarea producției celulare în alte țesuturi și sisteme, doar factorii fiind diferiți. Existența sistemului chalon - antichalon granulocitar a fost demonstrată prin izolarea și identificarea a doi factori granulocitari activi pe culturi de măduvă umană. Factorul de stimulare a coloniilor medulare (CSF), care activează granulopoieza, este o glicoproteină cu Mr de 45 000, produsă de monocite-macrofage, limfocite T stimulate și placentă. El a fost identificat în sânge și urină și ar fi un factor de tip antichalon. Activitatea CSF-inhibitoare (tip chalon) este atribuită unui grup de factori lipoproteici, în curs de identificare.

Mecanisme neuro-endocrine generale: granulopoieza este stimulată de toxinele microbiene, de resturile leucocitelor distruse, precum și de prezența unor proteine străine structurii organismului uman. Acești factori antigenici ar acționa declanșând reacții nervoase și endocrine.

Componenta nervoasă a mecanismului reglator este reprezentată de centrul simpatic al granulopoiezei din hipotalamus. Stimularea acestora cu unde ultracurte, în cadrul probei leucocitozei provocate, imaginată de prof. Gr. Benetato, determină creșterea cu 1 500-2 000/mm³ a numărului de leucocite circulante și, în același timp, stimulează fagocitoza.

Componenta endocrină este reprezentată de intervenția a numeroase glande endocrine:

- **sistemul hipofizo-corticosuprarenal**; stimularea secreției de factor eliberator (CRF) hipotalamic determină secreția de ACTH din hipofiza anterioară. Acesta determină creșterea secreției de glucocorticoizi din corticosuprarenală, care, exercitând efecte inhibitoare la nivelul măduvei, determină fenomene de eozinopenie și limfopenie. Eozinopenia este atât de constantă și caracteristică, încât a fost utilizată în cadrul testelor Thorn pentru cercetarea funcționalității axului hipotalamo-hipofizo-corticosuprarenal.

Alături de acțiunea ACTH, se consideră că hipofiza ar acționa stimulând granulopoieza și prin hormonii somatotrop și prolactină;

- **tiroida** a fost și ea implicată în reglarea granulopoiezei. Hipertiroidiile se însoțesc de eozinofilie cu limfocitoză, în timp ce hipotiroidiile se caracterizează prin leucopenie;

- **hormonii androgeni** stimulează granulopoieza.

Splina intervine prin secreția unui factor stimulator, precum și prin faptul că este o zonă importantă în distrugerea leucocitelor.

5.2.7.2. Funcțiile granulocitelor neutrofile și eozinofile

Așa cum s-a menționat deja (vezi mai sus), granulocitele își îndeplinesc funcțiile esențiale la nivel de țesuturi. Aceste funcții, legate de combaterea agenților antigenici pătrunși în organism, sunt reprezentate în esență de „acumularea focală“ fagocitică.

Acumularea focală. Faptul că leucocitele se acumulează în țesuturi la nivelul unde se cantonează agentul agresor este cunoscut de cca 127 de ani. Teoriile menite să explice mecanismul acestei focalizări au fost extrem de numeroase și nici până astăzi fenomenele nu sunt total elucidate.

Pătrunderea într-un teritoriu tisular a unui agent inflamator oarecare determină dilatarea capilarelor și venulelor din apropiere. Granulocitele își încetinesc circulația și se fixează pe peretele capilar (marginatie). Ulterior, modificându-și forma prin emiteră de pseudopode, ele se strecoară printre celulele endoteliale în spațiul interstițial. Acest fenomen de diapedeză este urmat de deplasarea amoeboidală și acumularea focală în jurul agentului inflamator care a declanșat procesul. În esență, această acumulare focală este consecința unei migrări direcționate. Direcția de migrare este dictată prin fenomenele de chimiotactism pozitiv (atracție) și negativ (respingere). Deși termenul sugerează doar intervenția mecanismelor chimice, chimiotactismul recunoaște la origine fenomene atât fizice, cât și chimice.

Mecanismele fizice sunt reprezentate în principal de atracția electrostatică dintre leucocitele încărcate pozitiv și focarul inflamator electronegativ, datorită acumulării de acizi organici rezultați din distrugerile tisulare. Aceste distrugeră apar în cazul infecțiilor datorită echipamentului enzimatic al agentului patogen, format din invazini (hialuronidază) și diverse proteaze. Mecanismul de atracție electrostatică a putut fi reprodus *in vitro*, cu ajutorul suspensiilor de rășini anionice sau cationice. În mediul de cultură, granulocitele se fixează pe particulele de rășini anionice și sunt respinse de cele cationice. Alături de atracția electrostatică, migrarea granulocitelor spre focarul inflamator se consideră a fi favorizată de prezența suprafețelor rugoase și tensiunea superficială scăzută din focar. Ca și factorii chimici discutați mai jos, aceste fenomene fizice determină zona de membrană în care devine posibilă emiteră pseudopodelor ce permit deplasarea.

Mecanismele chimice presupun existența unor factori care, produși de țesutul lezat, creează, prin difuziune la distanță, un gradient de concentrație de minimum 1% ce poate fi „perceput” și „urmărit” de granulocit. Dintre acești factori, unii determină fenomene de chemotactism pozitiv (atracție), în timp ce alții exercită efecte chimiotactice negative (respingere).

Chemotactismul se explică prin receptori specifici fieși sau mobili la chemoatractanți, situați pe suprafața membranei leucocitare. Acțiunea acestor receptori determină fluxuri ionice (influx de Ca^{2+} sau Na^{+}), cu depolarizare inițială, urmată de hiperpolarizare ulterioară (eflux de K^{+}), cu scăderea sarcinilor de suprafață, creșterea adezivității și modificări de volum. Acumularea și sechestrarea de calciu permit agregarea și dezagregarea microtubulilor. Aceste modificări ale aparatului contractil alături de deformabilitatea membranei reprezintă mecanismul deplasării orientate la care participă și nucleotidele ciclice (cGMP).

Dintre substanțele chemotactice pozitive se pot cita: ionii de calciu eliberați de țesuturile distruse; leucotoxinele tisulare eliberate prin distrugerile tisulare datorate agenților termici, mecanici sau chimici; ATP, ADP, bradikininele, toxinele bacteriene; opsoninele (factori nespecifici circulanți, de natură proteică, care joacă un rol de activare a procesului de acumulare focală); anticorpii specifici la antigenul tisular (care formează complexe antigen-anticorp, capabile să atragă granulocitele); sistemul complement (un sistem de nouă factori serici, ce se activează în prezența complexului antigen-anticorp). Sistemul complement acționează favorizând imunoaderența sau chemotactismul apropiat. Astfel, factorul 3 al sistemului complement (C3) se fixează simultan pe complexul antigen-anticorp și pe suprafața neutrofilului, determinând aderența lor. Același fenomen poate apărea și în cazul plachetelor, celulelor macrofage, eritrocitelor. O parte din factorii sistemului complement sunt solubili. Ei creează un gradient de concentrație care poate fi „recunoscut” de esterazele (serin esteraza) și ATPaza leucocitară. În acest fel, leucocitul ar fi ghidat în cursul deplasării sale spre focar. Factorii C3 și C5 determină deplasarea neutrofilelor și acționează asupra bazofililor, determinând eliberarea de histamină. Complexul de factori C5, C6, C7 „atrage” eozinofilele.

Chemotactismul negativ este determinat de o serie de factori chimici, cum ar fi leucocidinele (toxine microbiene), anestezicele, blocanții glicolizei anaerobe și unii hormoni (hidrocortizon, prednisolon).

Fagocitoza. Descriș de Mecinikov (1883), fenomenul este denumit astfel de la grecescul „fagein” (a mânca) și „ritos” (celulă). Fagocitoza este definită ca fiind mecanismul celular de apărare a organismului de elementele corpusculare și macromoleculare. Ea se asociază de obicei cu pinocitoza, care se adresează însă elementelor solubile. După Levaditi, fagocitoza s-ar desfășura în patru etape:

1. **Aderare:** pseudopodele granulocitelor se fixează pe suprafața corpusculului de epurat. Această aderență se realizează prin factori fizici (rugoșitatea corpusculului, electrooegativitatea sa) și factori chimici

(modificări locale ale membranei leucocitare). Aderența este favorizată și de prezența unor factori chimici, cum ar fi opsoninele și factorii sistemului complement. Procesul de aderare constă, în esență, din fixarea particulei de fagocitat (antigen) la nivelul unor receptori de pe suprafața membranei fagocitelor. Această fixare directă este foarte rară deoarece, în mod obișnuit, antigenele și mai ales agenții microbieni sunt echipați cu structuri de suprafață antifagocitare (capsule, toxine etc.). Acești agenți antifagocitari trebuie în prealabil „opsonizați” (inactivați) prin fixarea opsoninelor termostabile (anticorpi) sau termolabile (factorii sistemului complement). Pe suprafața leucocitelor există, de obicei, receptori pentru complement (mai ales C3b) și pentru anticorpi (Fc), ce permit fixarea complexului corespunzător cu antigenul. Acțiunea receptorilor Fc reprezintă semnalul pentru înglobarea materialului fixat.

2. **Înglobare:** pseudopodele se gelifică, retractându-se. Particula străină de organism este înglobată într-o veziculă membranară, numită fagozom. Această veziculă proemină în citoplasmă, unde este înconjurată de organele celulare și, după scurt timp, se detașează de membrană.

3. **Digestie:** lizozomii fagocitelor fuzionează cu fagozomii, formând fagolizozomul (lizozom secundar). Aceasta s-ar datora acumulării de acid lactic care, prin scăderea pH-ului, determină instabilitatea membranelor citoplasmice care se contopesc. Odată fuziunea realizată, hidrolazele lizozomale sunt injectate în interiorul fagozomului, începându-și acțiunea distructivă. Astfel, lizozimul și alte enzime de acest tip blochează oxidările în germeul înglobat, îi modifică permeabilitatea și determină astfel liza membranei sale. Aceeași acțiune de distrugere a membranei este exercitată prin peroxizii de brom, iod și clor proveniți din acțiunea mieloperoxidazei și din șuntul hexozomonofosfat. Acești peroxizi se fixează pe resturile tirozinice din membrană, determinând fenomenele de liză.

Energia necesară digestiei fagocitare provine, pe de o parte, din activitatea glicogenolizei, care mărește producția de acid lactic. Pe de altă parte, crește de cca 10 ori captarea de oxigen și glucoză.

Formarea fago-lizozomilor este favorizată și de creșterea sintezei și incorporării lipidelor necesare noii structuri membranare.

4. **Distrugerea leucocitelor** reprezintă ultima etapă (facultativă) a fagocitozei. Prin excesul de toxine eliberate în urma distrugerii germenilor sau chiar prin fenomene de autoliză datorate enzimelor lizozomale eliberate în citoplasmă, leucocitul este distrus și transformat într-un globul de puroi.

Funcția secretorie a leucocitelor în cursul inflamației. Eliberarea enzimelor lizozomale (citaze) în afara leucocitelor a fost intuită încă de Mecinikov. Laureatul premiului Nobel (1908) lega acest fenomen de lezarea sau chiar distrugerea leucocitelor în cursul fagocitozei. Astăzi se știe că această eliberare este un adevărat proces secretor realizat de leucocitele intacte și joacă un rol esențial în reacțiile locale și generale ale procesului inflamator. Secreția se realizează atunci când fago-lizozomul nu este complet separat de membrana celulară, menținând încă o comunicare cu mediul extern (regurgitare). Este posibilă și apariția unei exocitoze, ca urmare a activării receptorilor fără fagocitoză. Prin aceste procese sunt eliminate în mediul extracelular trei categorii de mediatori ai inflamației: este vorba de grupul radicalilor liberi (anionul superoxid, apa oxigenată, radicalii hidroxil, oxigenul atomic etc.), grupul derivaților de acid arahidonic membranar (endoperoxizi, tromboxani, prostaglandine) și, în fine, grupul enzimelor lizozomale (colagenaze, elastaze, catepsine).

Dintre acești factori leucocitari, mai importanți sunt:

– **enzimele lizozomale:** ajunse în afara granulocitelor, aceste enzime atacă și distrug membranele bazale ale epitelului vascular. Astfel, în cazul glomerulitelor renale, ele determină leziunile de glomerulonefrită acută. De asemenea, acțiunea acestor enzime stă la baza fenomenului Arthus, reprezentat de edemul și necroza locală declanșată prin infectarea subcutanată a antigenului la animalul sensibilizat. Prin același mecanism se produc și o serie de alte reacții vasculare locale sau sistemice, care favorizează ieșirea și acumularea focală a leucocitelor, având însă o serie de consecințe funcționale nefavorabile (lezarea renală, invazia agentului patogen, alterarea irigației unor teritorii).

Enzimele lizozomale acționează și prin activarea sistemului kininiformator (vezi capitolul circulație). Ele determină eliberarea a mari cantități de polipeptide de tipul bradikininei. Acești hormoni locali măresc permeabilitatea, determină instalarea unei vasodilației puternice și activează fagocitoza.

În fine, un ultim efect al acestor enzime lizozomale este și acela de activare a sistemului complement (vezi mai sus);

– *SRSA (slow reacting substance of anaphylaxis)* reprezintă un factor leucocitar leucotrienic eliberat în cursul fagocitozei. El acționează asupra granulocitelor bazofile, determinând eliberarea de histamină. Acțiunea puternic arteriolo- și capilarodilatatoare a acestei amine, combinată cu efectele sale venoconstrictoare, o fac să reprezinte un element declanșator în stările de șoc anafilactic;

– *proteinele bazice de natură leucocitară*, ajunse în mediul focarului inflamator, participă, la permeabilizarea vasculară din teritoriu, precum și la fenomenele de degranulare a mastocitelor (vezi mai jos). S-au descris patru tipuri în această categorie de proteine;

– *pirogenul*: această denumire se referă la substanțe de natură proteică, cu Mr de 10 000. Eliberate de leucocite în focarul inflamator, ele pătrund în circulație și determină, prin stimularea centrilor termogenezei din hipotalamus, reacția febrilă ce însoțește evoluția focarului;

– *tromboplastina neutrofilică*: granulocitele conțin și eliberează în cursul fagocitozei acest factor procoagulant. Alături de acesta, s-ar elibera și o serie de factori cu efecte anticoagulante.

Din cele sumar prezentate, rezultă că produșii de secreție leucocitară sunt capabili să declanșeze fenomene inflamatorii de mare extindere, a căror dezvoltare necontrolată poate duce la riscuri majore pentru integritatea morfo-funcțională a organismului. Controlul acestor reacții și menținerea în limite rezonabile a cantității de factori activi secretați se realizează printr-o serie de inhibitori endogeni ai inflamației. Astfel, ceruloplasmina circulantă (superoxid dismutază) limitează cantitatea de radicali liberi, iar antiproteazele (alfa₁-antitripsina și alfa₁-macroglobulinele) blochează hidrolazele lizozomale secretate. Concentrația de derivați arahidonici este limitată prin însăși turnover-ul rapid ce îl caracterizează. De altfel, prostaglandinele stabile (PGI₂, PGE₁, PGE₂) blochează secreția de hidrolaze lizozomale.

5.2.7.3. Funcțiile granulocitelor bazofile (mastocite)

Mastocitele sunt granulocite specializate în direcția stocării și eliberării de histamină. Ele furnizează cca 1/2 din histamina circulantă. Eliberarea aminei biogene se realizează astfel: într-un prim moment membranele citoplasmice fuzionează în jurul granulelor individuale; ulterior, granulele fuzionează între ele, formând vacuole mari; în final are loc descărcarea vacuolelor la exterior, prin ruperea membranei celulare.

Mecanismul de eliberare utilizează energia rezultată din glicoliză și este activat de prezența ionilor de Ca²⁺, Mg²⁺, precum și de serin esterazele tisulare și leucocitare. Procesul este blocat de adenozin monofosfatul ciclic (cAMP).

5.2.7.4. Complexul monocite-macrofage

Este un ansamblu celular circulant, cu largă variabilitate, caracterizat prin origine și funcție comune. Celulele acestui complex prezintă și particularități morfologice în funcție de țesutul în care ajung și acționează.

Celulele complexului monocite-macrofage provin din aceeași celulă mezenchimală nediferențiată.

La nivel de măduvă, celula stem multipotențială, suferind un proces de programare mieloidă, se transformă într-o celulă unipotențială. Aceasta generează prin diferențiere monoblastul, capul de serie al complexului care dă naștere prin diviziune promonocitului și apoi monocitului sanguin circulant. Diferențierea medulară durează cca 3–4 zile. Monocitul, odată eliberat în sânge, nu circulă decât 1–4 zile, după care, prin diapedefză, pătrunde în țesuturi, unde se maturizează definitiv și este stocat pentru perioade de 2 luni până la ani de zile sub formă de macrofage libere (fig. 5.26).

Un alt component tisular al complexului monocite-macrofage este grupul macrofagelor fixe. Ele sunt deosebit de dezvoltate în tractul gastro-intestinal, ficat (celulele Kupfer) și splină, unde formează sistemul reticulo-endotelial (SRE). Aceste celule monitorizează fluxurile lichidiene (sânge sau limfă) ce trec peste ele sau în apropierea lor. Raporturile lor cu capilarele sinusoidale sunt diferite în funcție de țesut și ele reflectă modul specific de acțiune a celulelor. Dacă în ficat macrofagul se află chiar în sângele capilar fără legături

vizibile cu endoteliul, în splină și măduva osoasă macrofagele sunt complet extravasculare, iar în ganglionii limfatici formează însăși pereții unor sinusuri limfatice.

În funcție de necesitățile organismului, macrofagele fixe pot deveni mobile și invers. În inflamații, trecerea monocitelor din circulație în țesuturi se accelerează semnificativ. Unele macrofage tisulare se pot divide.

Date de morfologie funcțională. Monocitele circulante pot fi de dimensiuni mari (20–30 μm diametru) sau mici (15–20 μm diametru): Nucleul, situat excentric, este rotund sau oval. Forma celulei depinde de starea sa funcțională. Monocitele în mișcare au, în general, o formă triunghiulară, cu unul dintre vârfuri rămas în urmă. Monocitele aderente pe o suprafață (sticlă) se aplatizează, nucleul rămânând central, în acest caz, marginile celulei devin franjurate și prezintă mișcări ondulatorii caracteristice.

Macrofagele tisulare sunt extrem de variate ca aspect și au organele bine dezvoltate. Diametrul variază între 20–50 μm.

Funcții. Funcția fagocitară diferă, după cum este vorba de forma liberă sau de cea fixă.

Macrofagele libere se deplasează spre particula de fagocitat prin fenomene chemotactice declanșate de factori mediatorii similari cu cei enumerați mai sus. Se descrie în cazul macrofagelor așa-zisul necrotactism (atracția de către resturile celulare distruse din focarul inflamator). Spre deosebire de granulocite, macrofagul poate fagocita un număr mai mare de particule voluminoase. Procesele de pinocitoză și micropinocitoză sunt, de asemenea, foarte active.

Macrofagele fixe (din ficat, ganglionii limfatici) participă la epurarea circulației fie prin extinderea de pseudopode, fie prin deschiderea unor vacuole de captare la suprafață.

Funcția secretorie (rhagocitrină) pare a fi mult mai dezvoltată decât s-a bănuțit inițial și compoziția secreției pare a diferi de la o zonă la alta și de la o circumstanță la alta. Ca și în cazul fagocitelor, prin aceste secreții macrofagele au o participare majoră la funcția de apărare locală și generală (fig. 5.27).

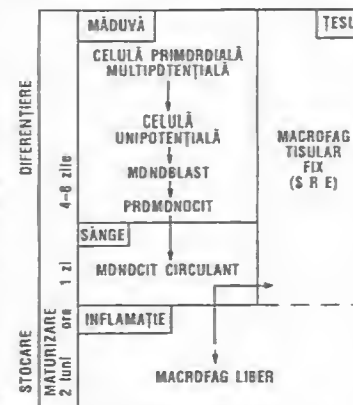


Fig. 5.26. Cinetica complexului monocite-macrofage.

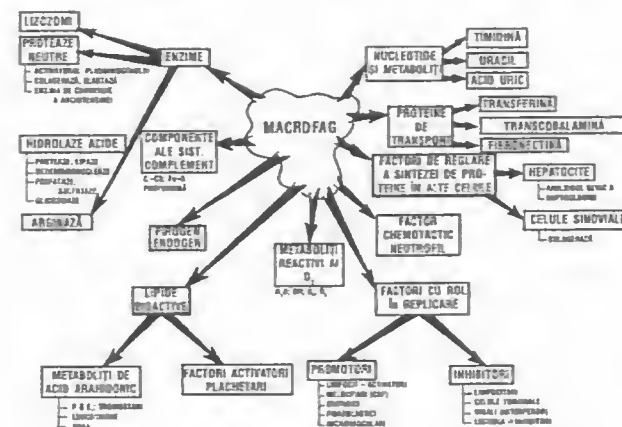


Fig. 5.27. Funcția de secreție a macrofagelor.

Funcția imunitară: macrofagele interacționează complex cu limfocitele în realizarea apărării specifice a organismului. În acest domeniu, datele și interpretările sunt deosebit de dinamice și departe de a fi definitive.

Interacțiunea macrofagelor cu limfocitele are loc în două etape: etapa de inducere a răspunsului imun, în cursul căreia macrofagul prezintă antigenul limfocitelor T și B în vederea declanșării răspunsului imun; etapa efectoare a imunității celulare (hipersensibilitate întârziată), în cursul căreia limfocitele T activate activează la rândul lor macrofagele în vederea distrugerii antigenului. Antigenul fagocitat este scindat incomplet de macrofag.

Astfel se izolează fragmentele caracteristice ale structurii moleculare antigenice, care reprezintă informația antigenică. Această informație este transmisă limfocitelor T, ce activează limfocitele B, care, pe baza ei, își modifică metabolismul proteic, în sensul sintezei anticorpilor specifici antigenului în cauză. Transmiterea acestei informații de la macrofag la limfocit poate avea loc sub formă complexată sau direct. Fragmentul antigenic, fie că se fixează pe ARN macrofagic, fie că determină producerea în macrofag a unui ARN informațional. În ambele cazuri, urmează o etapă de expulzare a informației astfel prelucrate, care este preluată de limfocit în circulație. Transferul poate avea loc și direct. Pe suprafața macrofagului conținător de informație antigenică se fixează un grup de limfocite, formând așa-zisa „insulă imunologică”, frecventă în măduvă, țesutul reticulo-endotelial și limfocitar. În aceste condiții, limfocitul preia direct informația antigenică complexată cu ARN, fără a mai trece printr-o fază circulantă.

În momentul transferului de informație, macrofagul secretă factorii ce inhibă acest proces, controlându-i astfel evoluția. În mod normal, macrofagele nu sunt capabile să distrugă toate formele antigenice. Abia după activarea limfocitelor T, acestea secretă limfokine capabile să inducă o creștere marcată a activităților citocide ale macrofagelor. În rândul acestor factori se includ astăzi: MIF (factorul de inhibare a migrației macrofagelor); MAF (factorul de activare a macrofagelor), factorul chemotactic macrofagic etc. Venind în contact cu acești factori, macrofagul își crește nivelul activității metabolice (creșterea absorbției calciului, a glucozaminei, producere de prostaglandine, de activatori ai fibrinolizei, ai factorilor sistemului complement), crește activitățile: pinocitotică, microbicidală, antitumorală, citotoxică etc.

Funcția metabolică: macrofagele participă la eritrocaterază, degradarea hemoglobinei și reciclarea fierului (vezi mai sus). Prin numeroasele esterase conținute, ele sunt implicate în metabolismul și sinteza a numeroase lipide (sternizi, lipide aterogene). Ele reprezintă o sursă semnificativă de uree, fixează și degradează insulina, eliberează factori ce induc fibrozarea (cicatrizarea) leziunilor.

5.2.8. LIMFOCITELE

Limfocitele sunt celule caracterizate printr-o mare plasticitate și un deosebit dinamism morfologic și funcțional. În funcție de dimensiuni, se descriu limfocite mici (4–10 μm) și mari (20–30 μm). Cele din urmă au un mare număr de organite celulare. Când limfocitele au nucleul cu cromatina dispusă sub formă de „spije de roată”, sunt denumite plasmocite. De obicei, acestea nu apar în circulație, fiind cantonate în țesutul limfoid și focarul inflamator. La microscopul electronic, suprafața limfocitelor este extrem de neregulată. În culturi celulare iau forma unei oglinzi de mână. Forma lor se datorează prezenței unui uropod, format din microvilozități rigide. Uropodul ar fi implicat în transferul informației antigenice.

Limfocitele indeplinesc, ca și restul elementelor leucocitare, rolul de efectori în funcția de apărare. Procesele vitale, de la nivel de celulă până la nivel de organism întreg, se află în permanență sub amenințarea creată de prezența agresorilor biologici (antigenici), pătrunși în țesuturi sau în circulație. Din rândul factorilor antigenici fac parte microorganismele, virusurile, celulele străine (hematii, grefe etc.), proteinele străine sau chiar țesuturile și proteinele proprii, dar care au suferit mutații sau distrugeri parțiale. Acestor multitudini de agresori li se opun *mijloacele de apărare ale organismului*. În funcție de specificitatea acestor mijloace față de un anumit antigen, se descriu două sisteme de apărare imunitară: nespecifică și specifică.

5.2.9. IMUNITATEA

5.2.9.1. Imunitatea specifică și nespecifică

Imunitatea este suma tuturor mecanismelor de apărare naturală ce protejează individul de agresiunea microorganismelor invazive: bacterii, virusuri, fungi, paraziți.

Funcția defensivă este asigurată de limfocite, fagocite (monocite, granulocite neutrofile) și o varietate de celule accesorii (granulocite eozinofile și bazofile, mastocite, plachete și celule prezentatoare de antigen). Acest sistem celular este distribuit difuz în organism, dar tinde să se grupeze într-un număr de organe limfoide, care cuprinde măduva hematogenă, timusul, splina și ganglionii limfatici. Aglomerări ale acestor celule se întâlnesc în țesuturile expuse mai frecvent la pătrunderea agenților patogeni, de exemplu în mucoasa digestivă și în cea a aparatului respirator (țesut limfoid asociat mucoaselor). Țesuturile limfoide sunt divizate funcțional în organe primare și secundare. Organele limfoide primare sunt timusul și bursa Fabricius (păsări) sau echivalentul funcțional al bursei la mamifere – măduva hematogenă. Organele limfoide secundare sunt ganglionii limfatici, splina, țesutul limfoid difuz și foliculii limfoizi. Varietate componentelor celulare interacționează, producând un răspuns imun coordonat și orientat spre eliminarea patogenilor și restrângerea la minimum a leziunilor produse de aceștia. Există două tipuri de imunitate: a) nespecifică (innăscută) și b) specifică (câștigată).

Mecanismele fiziologice ale imunității innăscute nu sunt dependente de o recunoaștere specifică a structurilor străine: o aceeași barieră defensivă (pielea, epitelile mucoaselor, enzimele din secreții, fagocitele, complementul, interferonii) conferă protecție față de diverși agenți patogeni sau potențial patogeni.

Răspunsul imun specific (adaptabil sau dobândit), ce este inițiat de expunerea la sau contactul cu o anumită substanță ori structură străină (numită antigen), presupune proliferarea limfocitelor, diferențierea și maturarea lor, secreția de factori solubili și anticorpi capabili de a reacționa cu antigenul și „memorarea” agentului agresor (răspunsul imun primar). La un contact ulterior cu același agent răspunsul este mai rapid, mai amplu și mai exact orientat, prin afinitatea crescută a anticorpilor și prin reacția mai promptă a celulelor sensibilizate. Rezistența conferită organismului agresat este mult sporită (răspuns imun secundar). Celulele implicate în reacțiile care conduc la un răspuns imun specific sunt programate să recunoască antigenul. Antigenul selectează acele celule care poartă receptori cu specificitatea corespunzătoare structurii sau conformației sale și generează, pe calea proliferării și a diferențierii, expansiunea unei clone de celule reactiv-specifice. Acest proces este numit selecție clonală.

Astfel, reacției imune specifice i se pot descrie patru caracteristici esențiale:

1. o fază de inducție, care cuprinde evenimentele de selectare și activare a limfocitelor în intervalul de timp ce urmează imediat expunerii la antigen;
2. abilitatea de a distinge, în cursul fazei efectorii, propriul de străin;
3. specificitatea, care restrânge reacțiile mediate prin anticorpi ori limfocite sensibilizate strict asupra antigenului omolog (declanșant);
4. memoria imunologică, care permite reactualizarea reacției la reîntâlnire ulterioară cu antigenul grație persistenței unor limfocite specializate în acest scop (limfocitele cu „memorie”).

Răspunsul imun specific este mediat prin două mecanisme interdependente: umoral și celular. Imunitatea umorală implică funcția limfocitelor B – burso-dependente (la păsări) sau derivate din măduva hematogenă (la mamifere). Celulele B exprimă receptori imunoglobulinici de o singură specificitate pe suprafața lor. Când acești receptori interacționează cu un antigen corespunzător, celula este activată, proliferază clonal, se diferențiază în plasmocit, care secretă cantități mari de imunoglobuline. Aceste imunoglobuline secretate reacționează specific cu același antigen ce a activat inițial limfocitul B în repaus. Imunoglobulinele, ca proteine din fracția plasmatică a serului, reprezintă componenta umorală, solubilă, a sistemului imun specific.

Imunitatea celulară, sau mediată celular, implică funcția limfocitelor-T (derivate din timus). Celulele T exprimă pe suprafața lor molecule-receptor care, structural, sunt similare imunoglobulinelor, fiind specifice pentru un anumit antigen.

Când antigenul omolog vine în contact cu acest receptor, el produce activarea, proliferarea și diferențierea celulei T. Rezultatul final al acestei expansiuni este reprezentat de apariția unei varietăți de subseturi celulare T cu diverse funcții. Aceste celule, pe care le întâlnim în sângele periferic și țesutul limfoid, sunt componenta celulară a sistemului imunitar specific.

Antigenele induc atât răspunsuri imune umorale anticorpoformatoare de către plasmocitele rezultate din activarea limfocitelor B, cât și reacții imunitare celulare de către diversele tipuri de limfocite T activate și prevăzute cu proprietăți citotoxice împotriva propriei lor prezențe.

Principalele funcții ale anticorpilor rezultați asupra celor două modalități de influențare a reacțiilor adaptative de apărare imunitară sunt menționate în fig. 5.28.

Deși termenii de „umoral” și „celular” sau „mediat celular” se referă, de obicei, la răspunsul imunitar specific, răspunsurile umorale și celulare pot fi, de asemenea, nespecifice (implicând funcția fagocitelor sau activarea complemmentului).

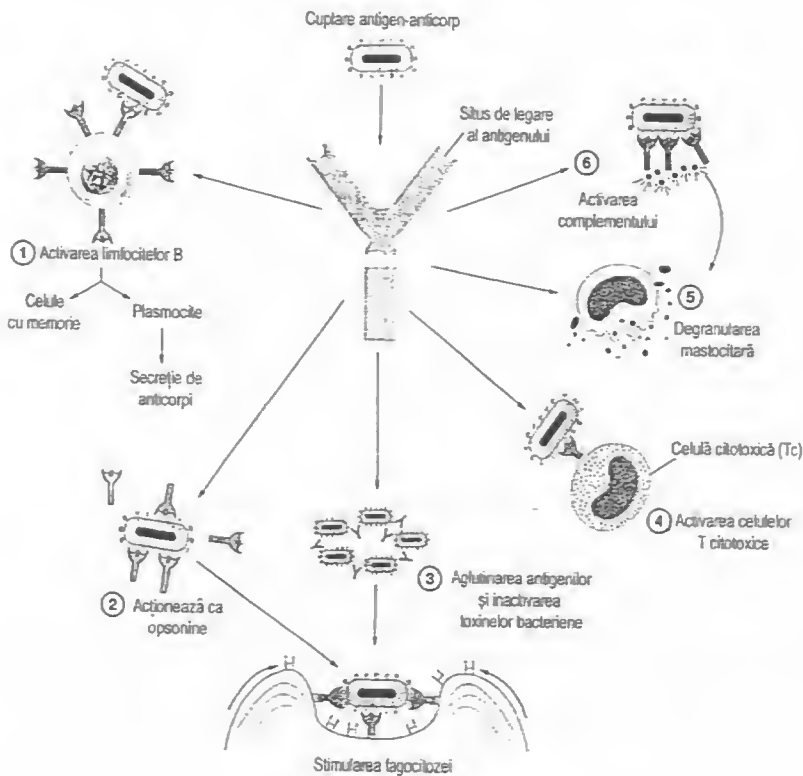


Fig. 5.28. Funcțiile anticorpilor în răspunsurile imune umorale și celulare.

5.2.9.2. Componentele sistemului imunitar nespecific

Prima linie de apărare antiinfecțioasă – sistemul imunitar nespecific – oferă protecție prin următoarele componente: bariere mecanice, inhibitori chimici și biochimici, factori fiziologici, fagocitoză, opsonizare, factori umorali, limfocite.

Barierile mecanice împiedică atașarea și penetrarea agenților infecțioși. Această funcție este asigurată de pielea intactă și mucusul suprafețelor mucoase.

Colonizarea și dezvoltarea bacteriilor este prevenită de acțiunea a numeroase substanțe întâlnite în producția de secreție: acizii organici din secreția glandelor sebacee, acidul clorhidric din stomac, acizii grași, acizii biliari, enzimele din salivă, lizozimul din lacrimi, lactoferina, tripsina, spermina.

Dintre factorii fiziologici ce contribuie la imunitatea nespecifică putem reține: a) temperatura corpului: multe microorganisme se dezvoltă precar la 37°C; b) presiunea de oxigen: crescută în special în plămâni, inhibă creșterea anaerobilor; c) balanța hormonală: o creștere a corticosteroizilor deprimă răspunsul inflamator și scade rezistența la infecții.

Fagocitoza reprezintă un mecanism central în imunitatea înăscută, fiind procesul prin care substanțele particulare, cum ar fi bacteriile, sunt ingerate de o celulă și distruse. Fagocitoza este o formă de endocitoză și se deosebește de pinocitoză sau de procesul de internalizare a lichidelor și soluțiilor. Funcția de fagocitoză necesită și presupune: energie generată de metabolismul glucozei, sinteză de noi membrane celulare și un sistem activ de proteine contractile citoplasmice. Fagocitele pot fi întâlnite în țesuturi sau sunt libere în circulație. Leucocitele polimorfonucleare neutrofile (PMN-N) sunt granulocitele din circulație capabile să migreze rapid, ca răspuns la invazia locală a microorganismelor. Într-un număr mult mai mic decât polimorfonuclearele neutrofile, monocitele pot, de asemenea, migra din circulație în afara vasului, unde se diferențiază în macrofage tisulare. Strategic plasate, aceste celule se întâlnesc pretutindeni: în alveolele pulmonare, splină și ganglionii limfatici, sinusoidale hepatice (celulele Kupfer), cavitatea sinovială (celulele A sinoviale), țesutul conjunctiv (histiocitele), rinichi (celulele mezangiale), creier (celulele microgliale). Migrarea fagocitelor din capilare prin traversarea endoteliului – diapedeza – este favorizată de creșterea permeabilității capilare și se face spre sediul infecției, pe direcția gradientului de concentrație realizat de acumularea unor factori solubili (factori chemotactici) la locul de pătrundere a agentului patogen. Această mobilizare și mișcare orientată se numește chemotaxie.

După realizarea contactului cu elementul particulat și legarea acestuia de suprafața celulară, fagocitul îl înglobează treptat în interiorul celulei, prin invaginarea membranei. Acest proces de activare a membranei duce, în final, la formarea unei vacuole fagocitice în citoplasmă, numită fagozom. Lizozomii – saci citoplasmatici cu enzime, conectați la fața internă a membranei – fuzionează cu fagozomul, realizând fago-lizozomul. În interiorul fago-lizozomului, materialul străin înglobat este digerat pe cale enzimatică. Lizozomii conțin în proporții diferite două categorii de granule: 33% primare (azurofile) și 67% secundare. Cele primare conțin numeroase enzime hidrolitice: mieloperoxidază, lizozim și proteine bazice (cationice) bogate în arginină. Granulele secundare conțin: fosfatază alcalină, lactoferină, lizozim. Enzimele acestor granule secundare sunt primele eliberate în fagozom, de obicei înainte ca vacuola să se fi închis complet. Astfel, ele sunt expulzate parțial în spațiul interstțial, eliminarea lor fiind denumită exocitoză. Evenimentele metabolice din timpul fagocitozei produc un număr de metaboliți toxici ai oxigenului: anion superoxid (oxigen molecular ce captează un electron în plus), apă oxigenată, radical hidroxil, oxigen singlet (unul din electroni se deplasează pe o orbită cu energie mai mare). Toți acești produși, foarte instabili, sunt în același timp și foarte toxici pentru bacterii.

Pe lângă liza intracelulară a elementelor particulare străine, macrofagele secretă numeroși compuși cu efect protector pentru organism. Dintre aceștia distingem: factori de diferențiere celulară, factori citotoxici (factorul de necroză tumorală – TNF), pirogeni endogeni (interleukina-1 și interleukina-6 – IL-1, respectiv IL-6), componente ale complemmentului (de la C1 la C5, properdina, factorii B, D, I, H). Sunt eliberate, de asemenea, variate proteine plasmice și factori de coagulare, α -interferon (IFN- α), enzime hidrolitice (colagenaze, lipaze, fosfataze), metaboliți ai acidului arahidonic (prostaglandine, tromboxani și leucotriene).

Fagocitoza poate avea loc în mod direct, în urma legării nespecifice a bacteriei de suprafața celulară, sau poate fi remarcabil amplificată și facilitată în urma opsonizării microorganismelor.

Opsoninele sunt substanțe prezente în plasmă și ser ce se leagă de elementele particulare și le conferă astfel o susceptibilitate mult sporită la fagocitoză. Opsoninele găsite în ser includ: produșii de clivare a componentelor complementului (C3b, C5b), anticorpii (mai ales IgG₁ și IgG₂, dar și IgG₃, IgG₄ și IgA).

Celulele fagocitice posedă receptori membranari pentru aceste molecule, ceea ce facilitează legarea materialului străin de suprafața celulară. Proteina C reactivă, fibronectina, leucotrienele acționează, de asemenea, ca substanțe opsonizante. La acțiunea fagocitelor se mai adaugă, ca elemente ale apărării nespecifice – antibacteriene sau antivirale, o serie de alți factori umorali și celulari. Complementul, interferonii (IFN-α, secretat de leucocite, IFN-β, secretat de fibroblaști) și limfocitele naturale ucigașe (NK – *Natural Killer*). Complementul, sau sistemul complement, este un grup de factori format din cel puțin 15 proteine serice, care, în mod normal, sunt inactive funcțional. Asemănător cu alte sisteme enzimatice din plasmă (coagulare, fibrinoliză), activarea sistemului complement de către un stimul declanșator (de exemplu, bacterii) produce un răspuns rapid, amplificat, mediat de un fenomen de cascade, unde produsul unei reacții este catalizatorul enzimatic al următorului component din sistem. Activarea cascadei complementului are efecte funcționale variate, producând opsonizarea și liza bacteriilor, formarea de factori chemotactici, eliberarea de histamină, serotonină și alți compuși vasoactivi prin activarea mastocitelor și bazofilelor, cu stimularea, astfel, a răspunsului inflamator.

Activarea complementului poate avea loc pe două căi, denumite calea clasică și calea alternativă. Calea alternativă este inițiată de pătrunderea bacteriilor și reprezintă o manieră de reacție imună nespecifică. Calea clasică este declanșată de prezența anticorpilor, fiind un mecanism al imunității adaptabile, specific, mai recent apărut în evoluție. Ambele căi evoluează în trei faze:

1. un eveniment de „recunoaștere”, ce inițiază cascada complementului;
2. o fază de amplificare, care realizează activarea fracțiunii C3, component critic al cascadei;
3. o fază de atac membranar, ce culminează cu formarea de canale în membrana celulară și liza țintei.

Cele două căi (alternă și clasică) diferă în ceea ce privește fazele de inițiere și amplificare, faza de atac membranar fiind identică.

Răspunsul imun nespecific este identificat, de asemenea, la nivelul unor celule limfoide. Aceste limfocite, care conțin adesea granulații citoplasmice azurofile, sunt citotoxice față de o varietate de ținte celulare, în absența oricăror expuneri anterioare la antigen. Aceste limfocite se numesc celule naturale (spontan) ucigașe (NK). Celulele NK au o funcție citotoxică față de celule autologe infectate viral și unele celule tumorale. Se pare că ar avea un rol în unele infecții bacteriene, parazitare sau micotice. Sunt implicate, de asemenea, în reglarea hematopoiezei. Ele acționează asupra celulei-țintă în urma unui contact celular intim și a eliberării de perforine din granulele citoplasmice. Perforinele eliberate polimerizează tubular și se inseră în membrana celulei-țintă, care este astfel lizată. Perforinele au o structură și un mod de acțiune asemănătoare cu cele ale sistemului complement. Celulele NK nu posedă o specificitate antigenică și nu dobândesc memorie imunologică în urma expunerii la celule infectate viral sau tumorale.

5.2.9.3. Antigene și imunogenitate

Răspunsul imun specific, declanșat de pătrunderea în organism a unei macromolecule sau a unei celule străine, este caracterizat prin apariția de proteine specifice – anticorpi, ce reprezintă produsul final de secreție a limfocitelor B sau și a limfocitelor specifice reactive, numite celule T. Anticorpii sunt receptori ai sistemului imun, care recunosc și leagă specific anumite structuri moleculare. Structurile moleculare ce pot fi recunoscute și legate specific de către receptori sistemului imun se numesc antigene.

Ceea ce este străin (*non-self*) față de planul propriu de organizare biologică a individului (*self*) poate declanșa, în urma contactului cu sistemul imun, un răspuns imun. Substanțele străine (antigenele) ce induc răspunsuri imune posedă două proprietăți: imunogenitate și antigenitate.

a) *Imunogenitatea* reprezintă capacitatea inherentă a unei substanțe de a induce un răspuns imun specific, exprimat prin formarea de anticorpi sau și de limfocite imune. În aceste condiții, substanța poate fi denumită și imunogen.

b) *Antigenitatea*, sau reactivitatea specifică, este proprietatea unei substanțe de a reacționa specific cu anticorpii sau limfocitele pe care le-a generat.

Proprietatea substanței conferită de antigenitate este deosebit de importantă. Reacția antigen-anticorp este probabil cea mai specifică reacție cunoscută în biologie.

Substanțele imunogenice sunt întotdeauna antigenice. Substanțele care posedă proprietatea de antigenitate nu sunt în mod necesar imunogenice. Această situație este evidentă în cazul haptelenor.

Haptenele sunt „antigene parțiale”, putând reacționa cu limfocitele imune sau cu anticorpi. Cu toate acestea, haptenele nu sunt imunogenice: ele nu pot să declanșeze singure producerea de anticorpi ori limfocite reactive specifice. Haptenele sunt, de obicei, molecule prea mici pentru a fi în același timp și imunogenice. Dacă haptena este cuplată pe o moleculă-purtător, ea devine inzestrată cu proprietăți imunogenice. Moleculele purtătoare pot fi: albumine, globuline ori polipeptide sintetice. Exemple clasice de haptene în medicina clinică sunt antibioticele, analgezicele ori alți compuși cu greutate moleculară mică. Odată introduse în organism, drogurile se cuplează adesea cu molecule purtătoare, devenind imunogenice. Răspunsul imun pe care îl vor declanșa poate fi exagerat și nociv, fiind denumit răspuns alergic.

Haptenele sunt, de obicei, atașate artificial la unele molecule. Moleculele native posedă însă anumite zone sau situsuri de legare și reacție cu anticorpii, denumite „determinanți antigenici” sau „epitopi”.

Epitopii sunt, funcțional, similari cu haptenele, cu diferența că epitopii, ca grupări determinate ale reacției cu anticorpii sunt parte integrată din molecula nativă (fig. 5.29). Epitopii pot fi foarte mici (de exemplu, 4–5 reziduuri de aminoacizi ori de monozaharide grupate în aceeași zonă spațială). Epitopii unui antigen pot fi liniari (o secvență continuă de aminoacizi), ori conformaționali (aminoacizi învecinați spațial într-o anumită zonă a moleculei, dar nesuccesivi în lanțul polipeptidic). Topografic, unii determinanți antigenici (epitopi) se pot găsi pe suprafața moleculei de antigen, în timp ce alții pot fi situați intern. Aceștia din urmă se exprimă și devin activi (induc formarea de anticorpi și limfocite imune) numai după ce antigenul a fost scindat enzimatic sau „procesat” de o celulă fagocitică.

Pe de altă parte, epitopii sunt imunoreactivi numai dacă aminoacizii lor sunt spațial accesibili datorită structurii terțiare (cuaternare) a proteinelor. Acești epitopi, numiți și grupări determinate sau determinanți antigenici, conferă specificitate moleculei de antigen și sunt cei care determină răspunsul imun. Anticorpii generați în cursul răspunsului imun sunt specifici pentru acești epitopi. O moleculă de antigen poartă, de obicei, mai multe seturi (sute, câteodată) de epitopi distincți. Fiecare set de epitopi identici determină apariția unui anticorp specific. Valența unui antigen se exprimă în raport de numărul epitopilor dintr-un set. Antigenul poate fi, deci, multivalent.

Desigur, antigenitatea unei molecule poate fi modificată artificial; se pot adăuga sau îndepărta epitopi. Cu fiecare schimbare, antigenitatea este schimbată. Conjugând haptene la molecula de antigen putem produce noi antigene și noi specificități. Denaturarea sau hidroliza proteinei vor distruge, practic, întotdeauna epitopii conformaționali.

Există o relație directă între amplitudinea răspunsului imun și gradul imunogenității antigenului. Gradul de imunogenitate (inducerea unui răspuns imun în anticorpi ori limfocite specifice reactive) a unei molecule de antigen este influențată de diverși factori. Relația este de proporționalitate directă între imunogenitate și produsul dintre „străin” (diferența filogenetică), complexitate chimică și greutate moleculară. Rezultă, astfel, substanțe puternic imunogene, slab imunogene și variate grade intermediare. În plus, structura chimică a antigenului, poziția și variabilitatea epitopilor influențează calitatea răspunsului imun în anticorpi. Majoritatea antigenelor vor determina proliferarea, diferențierea și maturarea limfocitelor B și, deci, sinteza și secreția de anticorpi numai ca urmare a unei stimulări concomitente a limfocitelor T. Limfocitele T care asistă și ajută (prin intermediul unor factori

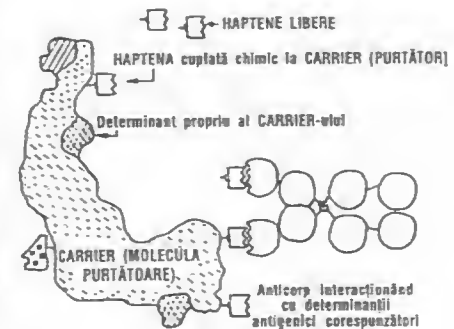


Fig. 5.29. Structura unui antigen, cu epitopi proprii sau haptene cuplate. Determinanții antigenici (epitopi, haptene) reacționează specific cu paratopii anticorpilor corespunzători.

solubili) limfocitele B se numesc limfocite T *helper* (ajutătoare). Din acest motiv, acest tip de răspuns, ce implică cooperare T-B, se numește timus-dependent (dat fiind că celulele T provin din timus).

O categorie limitată de antigene determină răspunsuri timus-independente. Antigenele implicate în aceste cazuri sunt caracterizate printr-o structură monoton-repetitivă a aceleiași tip de epitopi. Majoritatea sunt polizaharide ori proteine polimerizate (flagelina). Limfocitele B astfel stimulate vor produce numai IgM. În plus, răspunsul de tip anamnestice nu va apărea la administrările ulterioare ale aceleiași antigen.

5.2.9.4. Anticorpii

Anticorpii sau imunoglobulinele sunt glicoproteine prezente în fracția gamma-globulinică a serului. Anticorpii se găsesc atât în compartimentul intravascular, cât și în cel extravascular. Proteinele plasmatice care scaldă țesuturile asigură un schimb zilnic de 25% între cele două compartimente. Imunoglobulinele circulante sunt secrete de plasmocite, celule finale ale liniei celulare B. În lipsa unei stimulări antigenice, imunoglobulinele prezente în plasmă și țesuturi constituie așa-numitul „fond imunologic de anticorpi naturali”. Între acești anticorpi naturali există o gamă largă de specificități capabile să reacționeze cu un număr foarte mare de antigene. În urma expunerii la un antigen, ca urmare a stimulării limfocitelor B, categoria sau clasa de anticorpi ce vor interacționa specific cu acel antigen crește foarte mult. Acești anticorpi se vor lega specific de antigenul care a indus formarea lor, realizând mecanismul umoral al răspunsului imun.

Unitatea structurală de bază a unei molecule de imunoglobulină – monomerul – constă din patru lanțuri polipeptidice legate covalent prin punți disulfidice (fig. 5.30). Structura monomerului de imunoglobulină include două lanțuri identice grele H (*Heavy*), de 450–600 de reziduuri de aminoacizi, și două lanțuri identice ușoare L (*Light*), de aproximativ 230 de reziduuri, stabilizate și legate prin punți disulfidice intra- și interlanțuri. De lanțurile grele sunt atașate molecule de carbohidrați. Diferitele clase de imunoglobuline

sunt alcătuite din monomeri sau din polimeri ai acestei structuri de bază. Lanțurile grele sunt de cinci tipuri majore (μ , δ , γ , α , ϵ). Ambele tipuri de lanțuri, grele și ușoare, sunt pliate în domenii. Domeniile reprezintă regiunile globulare ale proteinei. Domeniile anticorpilor constau din două planuri de lanțuri beta pliate, menținute apropiate prin forțe hidrofobe și stabilizate prin punți disulfidice. Anticorpii pot fi grupați, pe baza similitudinilor structurale, în diferite clase și subclase, dependente de natura lanțului lor greu (μ , δ , γ , α , ϵ). Fiecare clasă este destinată unei anumite funcții. La mamifere există cinci clase de imunoglobuline: IgM, IgD, IgG, IgA, IgE. Unele dintre ele sunt divizate în subclase. Numărul de subclase pentru fiecare clasă variază de la specie la specie. La om există patru subclase pentru IgG (IgG_1 – IgG_2 – IgG_3 – IgG_4), două pentru IgA. În cadrul imunoglobulinelor din aceste clase, lanțurile ușoare sunt de două tipuri, K sau λ . Tipurile de lanțuri ușoare K sau λ se pot combina cu oricare dintre tipurile de lanț greu.

Examinarea gradului de variabilitate a aminoacizilor între diferitele molecule de anticorpi ai aceleiași clase indică faptul că cea mai mare variabilitate a secvențelor de aminoacizi este concentrată la nivelul domeniilor de la capetele

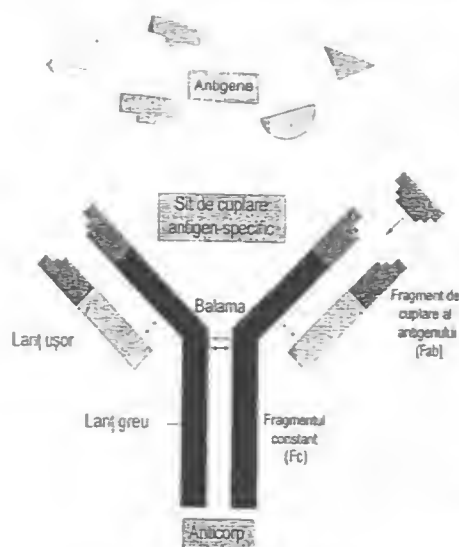


Fig. 5.30. Structura anticorpilor.

amino-(N) terminale ale lanțurilor grele și ușoare. Din acest motiv, această regiune este denumită regiune variabilă (V), în timp ce restul moleculei, cu o variabilitate foarte mică, este denumită regiune constantă (C). Astfel, V_H și V_L sunt domeniile variabile ale lanțurilor grele, respectiv ușoare, iar C_H și C_L , CH_1 , CH_2 , CH_3 – domeniile constante. Regiunea variabilă conține, la rândul ei, trei zone hipervariabile, denumite și „regiuni determinante ale complementarității” (CDR), care formează, de fapt, situsul de combinare cu antigenul.

Din punct de vedere biologic, molecula de imunoglobulină este bifuncțională. Ei i se poate identifica și separa un fragment, ce conține și situsul de legare a antigenului (Fab), și un fragment cu funcții efectoare, constituit din regiunile constante ale lanțului greu dinspre capătul carboxiterminal (Fc). La limita dintre cele două fragmente, Fab și Fc, molecula este prevăzută cu punți disulfidice plasate între lanțurile grele, zonă ce realizează „regiunea balama”. Regiunea balama conferă flexibilitate moleculei de anticorp.

Moleculele de imunoglobulină i se poate descrie o variabilitate izotipică, allotipică și idiotipică. Variabilitatea izotipică coincide cu clasele și subclasele prezente la toți membrii speciei (IgM, IgD, IgG, IgA, IgE). Allotipurile sunt variante alelice ale izotipurilor și se datoresc diferențelor genetice intraspecie. Idiotipurile reprezintă determinanți structurali unici (secvențe de aminoacizi) din regiunea variabilă, funcțional asociate cu capacitatea de legare a antigenului. Variabilitatea idiotipică se corelează astfel cu hipervariabilitatea regiunilor determinante ale complementarității (CDR) și, în ultimă instanță, cu cea a situsului de legare a antigenului. Situsul de legare a antigenului (epitopului) este o arie de interacțiune specifică și se numește *paratop*.

Sistemul imun uman este capabil de a produce un număr imens de molecule de anticorpi diferite, fiecare cu propria sa specificitate antigenică. Această diversitate este posibilă datorită faptului că genele pentru imunoglobuline interacționează într-un mod special. ADN embrionic conține un număr mare de gene pentru regiunile variabile ale lanțurilor grele (H) și ușoare (L). Apariția unei game largi de linii de celule B și plasmocite ce produc lanțuri H (L), diferite de la o linie celulară la alta, este posibilă datorită unui proces de recombinări somatice (rearanjări de gene pe ADN și deleții). La acest fenomen se adaugă o rată mare de mutații somatice la nivelul genelor lanțurilor H și L. Numărul maxim de paratopi distincți astfel rezulți s-ar ridica la 10^{15} – 10^{20} , ceea ce constituie „repertoriul imunologic”.

5.2.9.5. Celulele implicate în răspunsul imun specific

Macrofagele funcționează ca celule accesorii în răspunsul imun. Macrofagele sunt cele mai importante celule prezentatoare de antigen (APC), care procesează antigenul și-l prezintă celulelor limfoide. Interacțiunea lor cu antigenul este prima etapă în inducția răspunsului imun. Celulele foliculare dendritice, celulele dendritice interdigitate din splină și ganglionii limfatici, celulele Langerhans din piele și limfocitele B pot, de asemenea, prezenta eficient antigenul. Recunoașterea antigenului de către celula T implică prezentarea obligatorie a acestuia în asociere cu molecule ale complexului major de histocompatibilitate (MHC) de clasă I sau de clasă II. În afară de funcția de prezentare a antigenului celulelor T și B, macrofagele eliberează mediatori solubili, cum ar fi monokinele (cu efecte *hormon-like*), între care menționăm interleukina-1 (IL-1), care stimulează celulele T în diferențiere, maturare și secreție de limfokine (fig. 5.31).

Complexul major de histocompatibilitate (MHC) este un ansamblu de molecule cu funcție esențială în cooperările dintre celulele sistemului imun. Ele pot îngloba într-o zonă specială a moleculei lor, cu configurație de cupă, diverse antigene. Aceste antigene sunt fragmente

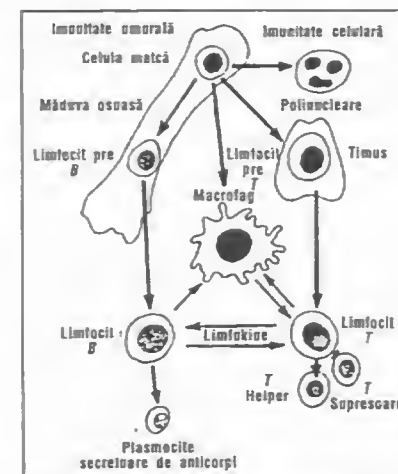


Fig. 5.31. Căile de formare a limfocitelor B și T.

peptidice, provenite fie din proteinele proprii (*self*), fie din antigenele străine (*non-self*). Existența acestui complex a fost descoperită în urma studierii fenomenului de respingere a grefelor.

Limfocitele T: precursorii celulelor T, proveniți din celula sușă hematopoietică, pătrund în timus, unde proliferază, se diferențiază și devin celule T imunocompetente. Diferențierea este însoțită de apariția și schimbarea unor markeri de suprafață. Instruirea limfocitelor T se desăvârșește în cortexul profund și în medulara timică prin două fenomene esențiale: selecția pozitivă și selecția negativă. Selecția pozitivă presupune recunoașterea complexului major de histocompatibilitate (MHC) propriu, expus pe celulele epiteliale timice. Fenotipul timusului care conține ambele clase (I și II) ale complexului major de histocompatibilitate (MHC) favorizează proliferarea timocitelor (limfocitelor T din timus), care pot recunoaște moleculele de MHC proprii (*self*) – fenomen denumit restricție MHC timică. Selecția negativă constă în eliminarea acelor celule T ce recunosc MHC asociat cu peptide proprii (*self*) de pe suprafața celulelor dendritice și a macrofagelor din medulară. Eliminarea sau inactivarea celulelor ce reacționează cu structurile proprii generează fenomenul de „*self* toleranță”. Celulele T imunocompetente vor recunoaște doar ceea ce este străin planului de organizare a organismului (*non-self*). Pe măsură ce timocitele se diferențiază, ele se selectează nu numai în ceea ce privește discriminarea *self*-ului de *non-self*, ci și în privința unor funcții efectoare. Astfel, în populația de celule T vom distinge mai multe subtipuri funcționale. Limfocitele T se pot caracteriza și prin punerea în evidență a unor markeri de suprafață (molecule proteice membranare), ce funcționează în general ca receptori. Aceste molecule de suprafață includ: molecule MHC clasa II (numai pe T activate) și clasa I, numeroși markeri CD („*Cluster of Differentiation*”) și receptorul pentru antigen (TCR). Dintre markerii CD (identificabili cu ajutorul unor anticorpi monoclonali), CD2, CD3, CD5 se întâlnesc pe majoritatea limfocitelor T circulante. CD4 și CD8 sunt prezente pe diferite subseturi de limfocite T. Acești doi markeri leagă moleculele de MHC de clasă II și, respectiv, I de pe macrofage sau alte celule în timpul prezentării antigenului.

Limfocitele T CD8+ (ce prezintă CD8 pe membrană) sunt fie celule T citotoxice, fie celule supresoare. Limfocitele T citotoxice (Tc), denumite și limfocite citolitice timus-dependente (CTL), produc liza specifică a unor celule-țintă purtătoare de antigen. Celulele T citotoxice recunosc epitopul străin în asociere cu moleculele MHC clasa I. Ele debarasează organismul de celulele ce exprimă antigenele străine și *non-self*. Celulele T citotoxice sunt induse și active față de tumori, celule infectate viral și țesuturi allogenice (transplante).

Limfocitele supresoare sunt, de asemenea, CD8+. Aceste celule sunt induse din precursori, în urma contactului cu antigenul, de obicei independent de asocierea cu MHC. Astfel, antigenele native (*self*) pot stimula dezvoltarea celulelor T supresoare (Ts) autoreglatoare. De asemenea, antigenele prezente în forme neimunogenice sau în concentrații foarte mari pot induce apariția și funcționarea celulelor T supresoare specifice. În urma recunoașterii antigenului de către celulele T supresoare, acestea vor interfera cu dezvoltarea răspunsului imun prin eliberarea de factori supresori solubili. Unii factori supresori au specificitate pentru epitopii antigenului, sugerându-se posibilitatea ca aceștia să fie receptori ai celulelor T (TCR) eliberați de pe membrană.

Limfocitele CD4+ sunt limfocite T *helper* (ajutătoare). Limfocitele T *helper* (Th) recunosc antigenul specific numai asociat cu MHC clasa II. Acest subset de celule T acționează asupra limfocitelor B, Tc, dar și asupra macrofagelor, eozinofilelor, mastocitelor, celulelor NK. Celulele Th activate promovează proliferarea și diferențierea acestora, precum și a lor însăși, prin intermediul a numeroși factori secretați: interleukinele-2, 3, 4, 5, 6, 10, γ -interferonul, factorul de necroză tumorală alfa (TNF- α), limfotoxina (TNF- β).

Funcția celulelor T este asigurată de receptorul pentru antigen (TCR). Pentru o celulă T dată, receptorii TCR sunt identici între ei. Moleculele TCR de pe o celulă T sunt capabile să recunoască specific numai un anumit epitop (antigen). Spre deosebire de anticorpi (sau de receptorii imunoglobulinici de pe suprafața limfocitelor B), structurile antigenice recunoscute de receptorii pentru antigen (TCR) ai celulelor T trebuie să fie, de regulă, asociate cu moleculele complexului major de histocompatibilitate (MHC). Recunoașterea unui determinant antigenic dat (epitop), de către o celulă T specifică, se realizează, deci, numai în cazul în care acel determinant este asociat cu o moleculă MHC clasa I sau II, situată pe membrana unei celule prezentatoare. De fapt, TCR recunoaște specific atât determinantul, cât și molecula MHC asociată acestuia. Moleculele CD4 sau CD8 (în funcție de subsetul celular T) vin, de asemenea, în contact cu o zonă a moleculei MHC de clasă II, respectiv I (fig. 5.32).

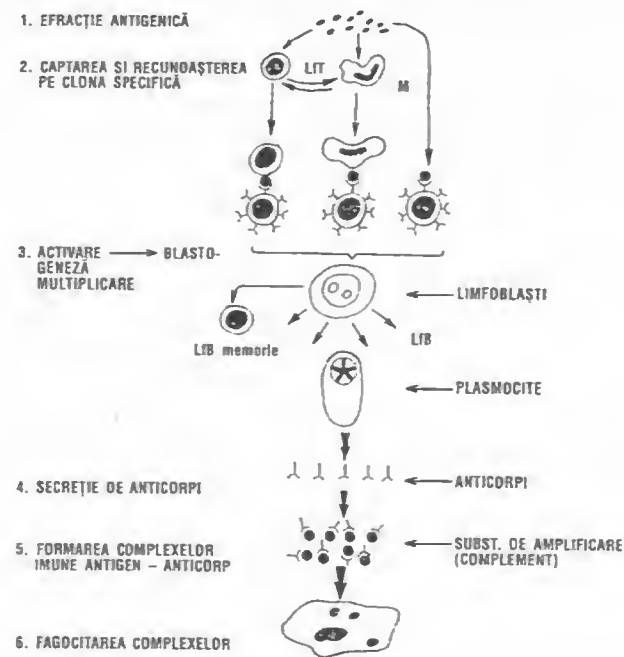


Fig. 5.32. Efectele răspunsului imun umoral.

Receptorul celulei T pentru antigen (TCR) este legat necovalent la nivelul membranei celulare cu lanțurile moleculei CD3, realizând un complex molecular, care, aparent, face contact atât cu antigenul, cât și cu complexul major de histocompatibilitate.

Din punct de vedere genetic, generarea receptorului pentru antigen al celulei T este identică cu cea a imunoglobulinelor. Spre deosebire de repertoriul imunoglobulinelor, repertoriul antigenic al TCR nu include determinanți conformaționali. TCR recunoaște specific numai scurte porțiuni de secvență primară ce sunt expuse pe suprafața celulei prezentatoare de antigen într-o cupă moleculară: „cupa” de prezentare a MHC. Dacă la imunoglobuline se descriu cinci clase de molecule (cinci izotipuri majore), la TCR sunt descrise două clase: receptori tip $\alpha\beta$ și, respectiv, $\gamma\delta$.

Limfocitele B: precursorii celulelor B își au originea în celulele sușă din măduva hematopoietică. În timpul maturării, ce are loc de asemenea în măduvă, limfocitul B suferă unele rearanjamente genice. Aceasta determină specificitatea antigenică a celulelor B încă înainte ca ele să populeze organele limfoide secundare. Mai târziu, recombinările somatice genice permit liniei celulare să efectueze comutarea de la o clasă de imunoglobuline la alta, fără schimbarea specificității antigenice.

Când celula B migrează în circulație și în țesutul limfoid periferic, ea poartă pe membrana sa imunoglobuline și este pregătită să interacționeze cu antigenul. Contactul dintre epitopul antigenului și receptorii imunoglobulinici membranari declanșează diviziunea celulară. Acest proces este mult amplificat prin interleukinele secretate de limfocitele T *helper* (Th). Celula B se poate matura în două direcții: spre plasmocit, ce va secreta cantități mari de imunoglobuline, sau spre celula B cu memorie, responsabilă de proliferarea rapidă din răspunsul anamnestic. În afară de receptorii imunoglobulinici membranari (în special monomerii IgM), pe suprafața celulelor B pot fi găsiți și alți markeri caracteristici acestei populații: CD10

(celule B imature); CD19, CD20, CD21, CD22, CD23, CD5 (ultimul, pe un subset de celule B predispus să producă autoanticorpi). De asemenea, celulele B posedă receptori pentru componentele complementului C3b și C3d, regiunea Fc a imunoglobulinelor, precum și MHC clasele I și II.

În timpul răspunsului imun, componentele celulare și umorale ale sistemului interacționează. Antigenul legat de membrana macrofagului este ingerat și procesat în interiorul celulei. Este digerat în fragmente mici și apoi cuplat cu glicoproteinele complexului major de histocompatibilitate (MHC) în citoplasma macrofagului. Complexul epitop-MHC este apoi transportat la suprafața membranei.

Antigenul ca atare sau procesat și prezentat este recunoscut atât de celulele B, cât și de celulele T. Aceste trei celule – Th, B, macrofag – interacționează, rezultatul final fiind proliferarea și diferențierea celulei B și secreția de imunoglobuline (fig. 5.33).

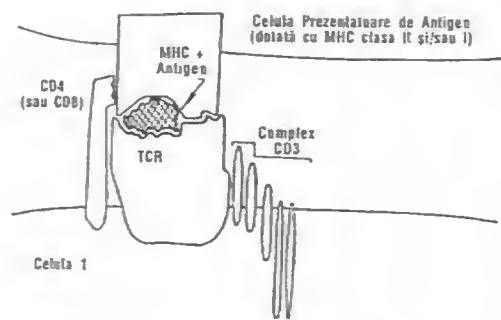


Fig. 5.33. Recunoașterea antigenului de către celula T.

constante (α , ϵ). Comutarea clasei este rezultatul acțiunii limfokinelor produse de limfocitele Th. Concomitent, aceste limfokine induc în celulele B mutații punctiforme în genele pentru partea variabilă a imunoglobulinelor, mutații care au ca rezultat producerea unor imunoglobuline cu capacitate de legare (afinitate) sporită pentru epitopul antigenului în cauză. Această amplificare a capacității de legare, generată continuu în răspunsurile de tip anamnestic, se numește maturare de afinitate.

În imunitatea mediată celular, cooperarea celulară funcționează asemănător, cu deosebire că celulele ce interacționează sunt Th, precursorii celulelor T citotoxice (Tc) și macrofagul.

Sistemul imun, ca orice alt sistem biologic, este supus reglării. Factorii principali implicați în reglare sunt: antigenul, anticorpii, complexe antigen-anticorp (complexele imune), interacțiunea dintre diverșii anticorpi generați (idiotip-antiidiotip), celulele T helper (Th), celulele T supresoare (Ts). În plus, sistemul imun este influențat și de alte sisteme ale organismului (endocrin, nervos).

Antigenul este stimulul principal al declanșării răspunsului imun. După stimulare și generarea de efectori (anticorpi și celule T reactive), cantitatea de antigen scade, redându-se concomitent și amplitudinea răspunsului imun. Anticorpii pot modula răspunsul imun în două moduri, dependente de bifuncționalitatea biologică a moleculei de imunoglobulină. Prima dintre ele este Fab-dependentă (realizându-se o competiție pentru legarea epitopilor între anticorpii secretați, liberi, și cei membranari). Aceasta duce la diminuarea stimulării prin intermediul imunoglobulinelor membranare. Cea de a doua este Fc-dependentă, prin intermediul receptorilor de tip Fc, și poate duce fie la amplificarea, fie la inhibiția răspunsului imun.

Reglarea de tip idiotip-antiidiotip se bazează pe următorul fenomen: zona bipervariabilă și regiunile învecinate din structura imunoglobulinelor, implicate în mod obișnuit în legarea antigenului, pot funcționa concomitent ca determinanți antigenici. Acești determinanți antigenici imunoglobulinici, apăruiți în cantități mari în răspunsul imun față de un anumit antigen, declanșează la rândul lor un răspuns în anticorpi. Dat fiind că zona hipervariabilă reprezintă idiotipul moleculei, anticorpii față de această zonă vor fi anticorpi antiidiotipici. Procesul de generare de anticorpi antiidiotipici se repetă în câteva (3-5) rânduri succesive,

Răspunsul imun primar apare în urma primei expunerii la antigen și produce o cantitate relativ redusă de anticorpi. În răspunsul secundar, ce are loc în urma unei expunerii ulterioare la același antigen, cantitatea de anticorpi specifici este foarte mare. În răspunsul primar, imunoglobulinele produse sunt în marea lor majoritate IgM. În răspunsul secundar, anamnestic, imunoglobulinele produse sunt IgG sau de alte clase. Această schimbare a clasei, realizată în condițiile păstrării specificității, se numește comutare de clasă. Comutarea de clasă se produce în celulele aceleiași linii celulare B, stimulată inițial. Comutarea de clasă este rezultatul unui proces genetic, în care genele pentru regiunea constantă μ sunt clivate și înlocuite cu γ sau cu alte gene ale regiunii

realizând o rețea de interacțiune idiotip-antiidiotip. Existența rețelei permite fenomene de stimulare sau de inhibiție a răspunsurilor imune, fenomene ce pot fi implicate și în menținerea memoriei imunologice. Rețeaua imună idiotip-antiidiotip este presupusă a funcționa și în sistemul celulelor T.

5.2.9.6. Tipuri de imunitate umorală după modul de instalare

Imunitatea prin anticorpi specifici unui antigen dat se poate instala prin mecanisme active, sau poate fi pasivă.

Imunitatea activă este rezultatul contactului cu antigenul care determină producerea anticorpilor specifici. La rândul său, ea poate fi naturală sau artificială.

Imunitatea activă naturală este imunitatea dobândită, de obicei, în cadrul stărilor de boală aparentă sau inaparentă. Imunitatea activă artificială se realizează prin vaccinare cu antigene, a căror virulență este atenuată, dar cu proprietăți antigenice păstrate.

Imunitatea pasivă se obține prin introducerea în circulație a anticorpilor deja formați, din afara organismului.

Se folosesc seruri bogate în anticorpi specifici de la om sau animale imunizate activ pe căi naturale sau artificiale. Atât imunitatea activă, cât și cea pasivă asigură rezistența organismului față de un factor antigenic cu care a fost anterior în contact. Forme particulare ale reacțiilor de apărare imunitară, ce depășesc cadrul normalului, sunt alergiile și șocul anafilactic.

5.2.10. TROMBOCITELE

Denumite și plachete sanguine, trombocitele sunt elemente aceluare, anucleate, care, aflându-se în circulație, joacă un rol important în procesele de hemostază.

Trombopoieza. Trombocitele se formează în măduva roșie hematogenă, din aceeași celulă stem multipotențială ce a fost descrisă mai sus. Prin procese de diferențiere și diviziune, din această celulă se formează megacarioblastul cu nucleu și diametrul de 20-30 μ m. Etapa următoare a seriei este promegacariocitul bazofil, cu nucleu lobat. În fine, după 4-5 zile, apare precursorul direct – megacariocitul matur. Nucleul acestei celule este multilobat și ușor picnotic, iar citoplasma conține numeroase granulații. Membrana prezintă frecvente invaginații, din care se formează membrane de demarcare. Acestea reprezintă cca 1% din celulele medulare. Prin fragmentarea megacariocitului matur se eliberează în circulație plachetele sanguine (fig. 5.34). Această fragmentare se poate desfășura în două moduri diferite.

Megacariocitul emite filamente de citoplasmă ce pătrund în capilarele sinusoide, fragmentându-se treptat în trombocite ce se desprind. O altă posibilitate este cea de fragmentare extravasculară. Megacariocitul expulzează trombocitele unul câte unul, ulterior producându-se traversarea endoteliului vascular și pătrunderea în circulație. În ambele situații, nucleii megacariocitari rămân în măduvă. Producția zilnică de plachete este de $20\,000 \pm 50\,000/\text{mm}^3$ sânge.

Cinetica trombocitară. O treime din trombocitele organismului, și mai ales cele nou-formate, sunt cantonate la nivelul circulației splenice. Restul de 2/3 se află în circulație. Durata de viață a unui trombocit a fost apreciată ca fiind de cca 8 zile. Ele sunt distruse în circulația generală, dar și în splină și ficat.

Reglarea trombopoiezei. Se consideră că procesul de formare a trombocitelor depinde de prezența unei

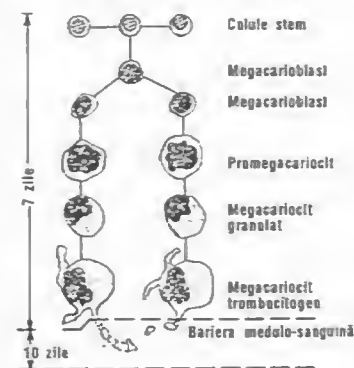


Fig. 5.34. Trombopoieza (reprezentare schematică).

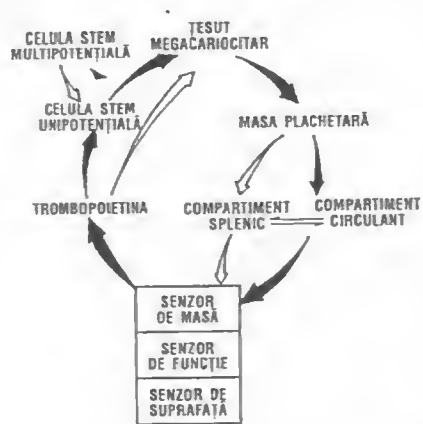


Fig. 5.35. Model de control în feed-back al trombopoiezei.

trombopoietine activatoare, similară cu eritropoietina. Deși prezența și oatura sa nu sunt încă clarificate, se crede că acest factor ar adapta trombopoieza la necesitățile organismului. Factorul se produce continuu, concentrația sa depinzând de numărul de trombocite circulante pe care se fixează. Scăderea acestui număr ar lăsa liberă o cantitate de factor stimulator, suficientă pentru activarea trombopoietică. Există și argumente în favoarea unei strânse corelații între trombo- și eritropoieză (fig. 5.35).

Hormonii estrogei și corticosteronul determină trombopenia, iar splina ar secreta factori umorali stimulatori, dar și inhibitori ai trombopoiezei.

Aceste mecanisme acționează în sensul menținerii numărului de trombocite circulante la valori cuprinse între 180 000 și 400 000/mm³ sânge.

Scăderi sub 150 000/mm³ sunt cunoscute sub denumirea de trombopenii și generează tulburări de coagulare. Creșteri peste 500 000/mm³ (trombocitoze) determină fenomene de hipercoagulabilitate.

Morfologia funcțională. Trombocitele au un diametru de 2-3 μm. Ele prezintă trei zone structural funcționale net delimitate:

- zona periferică: implicată în procesele de adeziune și emiterea de pseudopode;
- zona de sol-gel (hialoplasma) este zona eminent contractilă a trombocitului;
- zona organelor (granulomer) are o funcție predominant secretorie și conține granule și corpi denși secretori.

Compoziția trombocitelor. Plachetele sanguine conțin glucide (1,9%), proteine (12%) și lipide (3%). La periferie prezintă un inel de microtubuli ce conțin actină și miozina.

Cu microscopul electronic au fost puse în evidență două tipuri de granule: unele dense, cu conținut bogat în ADP și serotonină ca factori agreganți, și altele conținătoare de proteine biologice active.

Dintre compușii proteici, o importanță funcțională deosebită au:

- trombostenina: proteină de tip contractil asemănătoare acto-miozinei și prevăzută cu activitate ATPazică;
- fibrinogenul: factor procoagulant, din care numai 25% este de origine endogenă, restul de 74% fiind captat de plasmă;
- factorii procoagulanți V, VIII, XI și XIII. Factorul V a fost descris inițial sub denumirea de factor 4 plachetar;

- factorul 2 plachetar este un factor procoagulant propriu trombocitului și fără echivalent plasmatic. Joacă un rol deosebit în activarea fibriogenului, pe care îl sensibilizează la acțiunea trombinei, accelerând formarea monomerilor de fibrină. Participă la agregarea plachetelor și blochează acțiunea antitrombinei III (vezi hemostaza fiziologică).

Dintre compușii lipidici cu rol funcțional se poate cita în mod special factorul 3 plachetar. Acesta este un fosfolipid lipoproteic, ce reprezintă componenta lipidică absolut necesară pentru activitatea enzimatică a tromboplastinei.

Trombocitele conțin și cantități importante de serotonină captată din circulație.

Funcțiile trombocitelor. Trombocitele sunt elemente înalt adaptate funcției hemostatice. În cursul acestui proces, ele aderă la peretele vascular lezată, sunt stimulate de acest contact, se agregă și secretă, realizând timpul trombocitar al hemostazei (vezi mai jos) din cadrul reacțiilor de apărare antihemoragică.

5.2.10.1. Hemostaza fiziologică

Prin hemostază se înțelege ansamblul mecanismelor prin care organismul se apără împotriva hemoragiilor. Alături de hemostaza fiziologică, spontană, care este eficientă mai ales în cazul hemoragiilor din vase mici și capilare, se descriu o hemostază medicamentoasă, precum și una chirurgicală. Acestea se utilizează în situația unor hemoragii ce depășesc capacitatea hemostatică a organismului (boli hemoragice prin deficit de factori procoagulanți, hemoragii din vase mari și mijlocii).

Hemostaza fiziologică este, din punct de vedere dinamic, o suită de fenomene interdependente, suprapuse în timp (fig. 5.36).

Pentru o descriere sistematizată, se consideră că hemostaza s-ar desfășura în patru timpuri.

1. Timpul parietal reprezintă ansamblul fenomenelor prin care lumenul vasului lezată se micșorează, reducând sau chiar oprind momentan hemoragia. Această reducere se realizează în esență prin spasmul musculaturii vasculare. Într-un prim moment, contracția este de natură miogenă; lezarea determină direct contracția fibrelor musculare interesate. Aproape simultan, acestui spasm miogen i se suprapune un mecanism reflex simpatic. Lezarea vasului stimulează reflex centrul vasoconstrictor medular, care determină vasoconstricția teritorială. Cu cât leziunea este mai întinsă, cu atât spasmul este mai puternic. Astfel se explică de ce în leziunile prin zdrobire hemoragia este inițial mai redusă decât în leziunile prin tăiere cu lame fine.

Spasmul vascular reflex sau miogen este susținut în timp prin intervenția unor mecanisme umorale. Serotonina eliberată din plachete, precum și catecolaminele (adrenalină, noradrenalină) din atmosfera periplachetară, venind în contact cu receptorii musculaturii vasculare, determină o vasoconstricție prelungită.

Alături de fenomenele de vasoconstricție, reducerea lumenului vascular este favorizată și de acțiunea compresivă a edemului tisular, ce se dezvoltă în zona lezată.

2. Timpul trombocitar este reprezentat de formarea așa-zisului trombus alb trombocitar, ce vine să închidă mai ferm lumenul vascular deja contractat.

Trombusul alb se formează prin aderarea trombocitelor de pe peretele vascular lezată și agregarea lor ulterioară.

Aderența parietală: venind în contact cu fibrele de collagen sau membrana bazală dezgolate prin lezarea endoteliului, trombocitele aderă la acestea. Se consideră că aderența ar fi condiționată de prezența grupărilor aminice din structura collagenului. Trombocitele aderate suferă ulterior un proces de degradare, expulzând ADP, factor 3 plachetar și catecolamine, care inițiază etapa următoare, de agregare.

Agregarea trombocitelor se desfășoară în trei faze: agregare provizorie, remisiune și agregare definitivă.

Agregarea provizorie, denumită și *val primar*, este fenomenul de fixare a trombocitelor între ele. La declanșarea acestui mecanism participă numeroși factori umorali, și anume: adenozin difosfatul plachetar și eritrocitar, acizii grași liberi (crescuți în arterioscleroză); ionii de Ca²⁺ și Mg²⁺; fibrinogenul plachetar; factorul anti-Willebrand; trombosina (în cantități mici); catecolaminele și serotonină.

După ce prin agregarea provizorie s-a format un trombus parțial permeabil, urmează *faza de remisiune*. În cursul acesteia, trombocitele suferă o contracție ceotripetă și expulzează produși de secreție în spațiile canaliculare din trombus. Acești produși pregătesc desfășurarea etapei ulterioare, de *agregare*

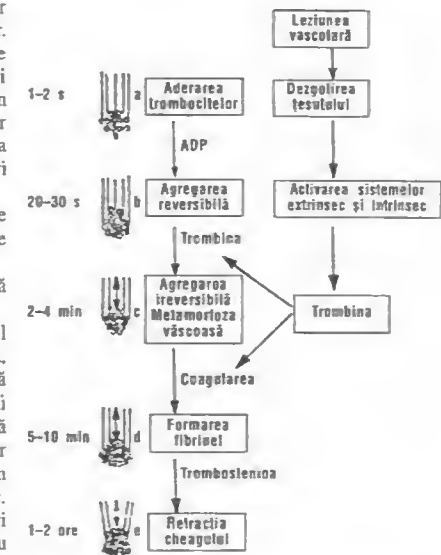


Fig. 5.36. Desfășurarea în timp a unui proces de hemostază fiziologică.

globulină sintetizată la nivel de ficat în prezența vitaminei K. I se atribuie rolul de activator al factorului III în mecanismul extrinsec al coagulării.

Factorul VIII, sau factorul antihemofilic A (AHF), este cunoscut și sub denumirile de globulină antihemofilică A (GAHA, AHGA). A fost descris de Quick în hemofilia clasică tip A. I se atribuie rolul de a activa factorul X în mecanismul intrinsec al coagulării.

Factorul IX, antihemofilic B (GAHB), factor Christmas sau PTC (component al tromboplastinei plasmate), participă la formarea activatorului protrombinei prin mecanism intrinsec.

Factorul X este denumit și factor Stuart-Power, sau factor Stuart, sau autoprotrombină C. Activarea sa reprezintă calea finală comună în ambele mecanisme de coagulare, extrinsec și intrinsec.

Factorul XI, sau antihemofilic C (GAHC), este cunoscut și sub denumirea de antecedent al tromboplastinei plasmate (PTA). Este interesat în mecanismul intrinsec al coagulării.

Factorul XII, sau factorul Hageman, este un important element de declanșare a mecanismului intrinsec al coagulării. În activarea sa sunt implicați numeroși factori, cum ar fi, de exemplu, contactul cu suprafețe rugoase, electronegative, prezența acizilor grași liberi și a sărurilor de sodiu ale acestora, contactul cu acidul uric, acidul ellagic și fibrele de collagen. În forma activată, factorul desfășoară activități esterazice și peptidazice, capabile să declanșeze activarea în serie a celorlalți factori plasmatici.

Cercetările din ultimii ani au adus numeroase detalii cu privire la mecanismul acestei activări, în cursul căreia ar apărea bucle de *feed-back*, cu rol amplificator. S-a stabilit astfel că o activare eficientă a factorului Hageman necesită acțiunea cooperativă a contactului cu suprafața electronegativă în prezența factorului XI și a unui precursor al plasmakininelor, numit kininogen, cu greutate moleculară mare. Fixarea factorului Hageman pe suprafața de activare, în prezența celor două proteine, duce la o activare inițială generând cantități minime de F. XIIa. Ulterior, aceste mici cantități de factor activat determină la rândul lor atât activarea factorului XI, cât și activarea unui precursor enzimatic din plasmă (numit prekalicreină) într-o enzimă activă, kalicreina. Ambii factori, pe lângă acțiunile specifice (procoagulante, în cazul F. XIIa, și plasmakinin-eliberatoare, în cazul kalicreinei), acționează în *feed-back*, accelerând formarea de factor Hageman activ. Se descriu două forme de factor Hageman activ. Forma alfa, cu greutate moleculară mare, capabilă să activeze F. XI, rămâne legată de suprafața activantă și limitează local coagularea intrinsecă. Forma beta, cu greutate moleculară mică, intră în curentul circulator, unde diseminează formarea de kinine și plasmagină fără a fi însă capabilă să activeze F. XI.

Factorul XIII este denumit și factor Laki-Lorand, fibrinază sau factor stabilizator al fibrinei (FSF). Factorul este o alfa-globulină și se activează în prezența trombinei și a ionilor de Ca^{2+} . În forma activată este o transglutaminază, cu Mr de 130 000, care stabilizează monomerii de fibrină polimerizați spontan, determinând formarea legăturilor izopeptidice ce conferă rezistența structurilor moleculare.

Sinteza hepatică a factorilor II, VII, IX și X necesită prezența vitaminei K. Rolul vitaminei este de a atașa structuri proteice postribozomale (grupări prostetice cu afinitate pentru calciu) la nivelul regiunii aminoterminală (grupări gamma-carboxilglutamice). În avitaminoze sau în cazul terapiei anticoagulante cu antagoniști ai vitaminei K, factorii se sintetizează într-o formă incompletă, incapabilă să fixeze ionii de calciu (proteine induse de absența vitaminei K: PIVKA; decarboxiprofeine).

Factorii plachetari ai coagulării. Trombocitele conțin numeroși factori implicați în coagulare. Prin similitudine cu cei plasmatici, s-au descris succesiv nouă factori plachetari. Ulterior, s-a stabilit că o parte dintre acești factori sunt de fapt captați de trombocit din plasmă și reținuți până în momentul distrugerii.

Factorul 1, de fapt identic cu factorul V.

Factorul 2, identic cu fibrinogenul plasmatic (factor I).

Factorul 3, denumit și factor fosfolipidic plachetar, joacă rol de cofactor în mecanismul intrinsec al coagulării.

Factorul 4, sau factor antiheparinic plachetar, intervine în inactivarea heparinei, limitând acțiunea anticoagulantă a acesteia.

Factorul 5, cunoscut și sub denumirea de proteină S, nu are încă un rol bine definit în mecanismul coagulării.

Factorul 6 este un factor antifibrinolitice, care împiedică liza prematură a trombusului de fibrină.

Factorul 7 este de fapt serotonina plachetară (vezi mai jos).

Factorul 8 este retractozimul plachetar, implicat în retracția trombusului de fibrină.

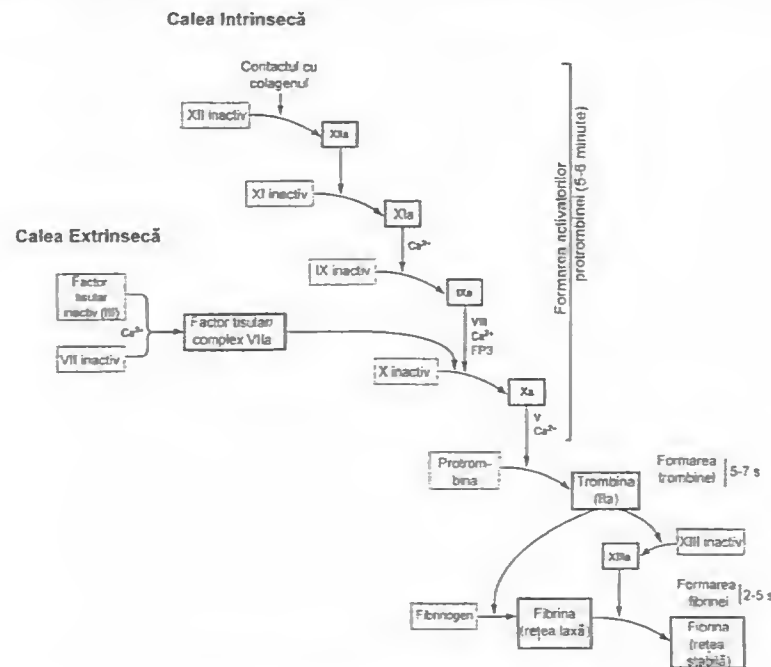


Fig. 5.39. Factorii intrinseci și extrinseci ai coagulării.

Factorul 9 este identic cu factorul II plasmatic.

Formarea trombusului de fibrină are o durată de cel mult 6-8 min, din care majoritatea este afectată etapei de formare a activatorului protrombinei. Formarea trombinei este un proces ce se desfășoară în 5-7 s, iar formarea fibrinei în doar 2-5 s. Dacă în ceea ce privește secvența acestor fenomene există un consens general, în ceea ce privește mecanismul intim al coagulării păreri sunt încă împărțite.

Există în prezent două teorii majore ale coagulării: teoria cascadei enzimatice a lui Mac Farlane și teoria autocatalizei emisă de Seegers.

Teoria cascadei enzimatice

Emisă de Mac Farlane în 1964, această teorie privește procesul coagulării ca fiind o succesiune de acțiuni enzimatice. Produsul fiecărei trepte contribuie la declanșarea etapei următoare (fig. 5.39). Studii ulterioare, asimilând și păstrând datele prezentate în schema Mac Farlane, au demonstrat că factorii coagulării nu acționează izolat, ci formând complexe dotate cu activități multiple și adesea adsorbite pe fosfolipide. Aceste observații au determinat propunerea unor scheme de coagulare ce subliniază apariția unor astfel de complexe. Este cazul schemei trifazice a coagulării (Blomback, 1966) sau al celei a coagulării în patru trepte (Hemker, 1970) (fig. 5.40).

A. Formarea activatorilor protrombinei. După cum factorii ce participă la acest proces sunt de origine strict sanguină sau și de origine tisulară, se descriu un mecanism intrinsec și, respectiv, un mecanism extrinsec.

a) Calea extrinsecă. Este urmată ori de câte ori, prin lezarea peretelui vascular, sângele vine în contact cu jesuturile. În aceste condiții, tromboplastina tisulară (F. III) împreună cu ionii de Ca^{2+} (F. IV) și

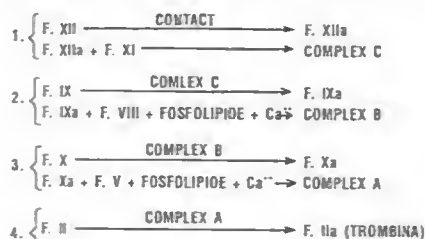


Fig. 5.40. Ipoteza coagulării în patru trepte (după Hemker, 1970).

În acest proces intervine kininogenul cu greutate moleculară mare, care fixează F. XI de suprafața lezată unde se află F. XIIa. Este posibil uneori ca lanțul de reacții să fie inițiat la nivelul celei de a doua trepte. Factorul XI ar fi sensibil la acțiunea aceluiași condiții activante ca factorul XII. În forma activată și în prezența ionilor de calciu (F. IV), factorul XI acționează asupra globulinei antihemofilice B (F. IX), activând-o. S-a descris și posibilitatea activării factorului IX de către „complexul extrinsec” (F. VIII, F. III, F. IV). Factorul IXa acționează asupra globulinei antihemofilice A (F. VIII), pe care o activează. Pentru acest efect este necesară prezența calciului și a factorului 3 plachetar. Se consideră că, de fapt, factorul VIII împreună cu factorul IXa, factorul 3 plachetar și factorul IV ar forma un complex dotat cu activitate enzimatică, capabil să determine activarea factorului X. Este posibil ca și această treaptă să reprezinte, de fapt, doar un proces de adăugare a factorului XI la complexul deja format. Într-un ultim moment, prin acțiunea asupra factorului V, ce se adaugă în calitate de coenzimă, se formează activatorul protrombinic intrinsec.

B. Formarea trombinei active. Este procesul prin care protrombina plasmatică (F. II) trece într-o enzimă activă – trombina (F. IIa). Reluând unele date de mai sus, această activare poate avea loc prin mecanism intrinsec sau extrinsec. Călea intrinsecă este considerată ca fiind secundară. Cele două căi coverg la nivelul factorului X, a cărui activare, urmată de activarea factorului V, reprezintă călea finală comuna a formării activatorului protrombinic. Factorul VII nu intervine decât în călea extrinsecă, pe când factorii XII, XI, IX și VIII nu intervin decât în călea intrinsecă.

Pentru a-și desfășura acțiunea, este absolut necesar ca activatorul protrombinic să conțină o fracție lipidică. Aceasta este furnizată de tromboplastina tisulară (F. III), în călea extrinsecă, și de f. 3 plachetar, în călea intrinsecă.

Odată formată, trombina acționează în *feed-back* pe lanțul reacțiilor descrise. Astfel, în concentrații reduse, ea exercită efecte activatoare la nivel trombocitar (eliberarea de f. 3), la nivelul F. VIII și F. X. Astfel de concentrații apar nu numai la începutul procesului de coagulare propriu-zis, ci și în condiții normale, datorită stimulării permanente a sistemului prin microtraumatismele sau modificările infime de structură ale endoteliului vascular. În concentrații mari, trombina exercită efecte de inhibiție a activării factorilor VIII și X, prevenind astfel extinderea excesivă a coagulării.

C. Formarea fibrinei. Din momentul în care devin disponibile primele cantități de trombină activă, se declanșează procesul de formare a fibrinei. Acest proces evoluează în trei etape: proteolitică, de polimerizare și de stabilizare.

Faza proteolitică: trombina atacă regiunea aminoterminală a lanțurilor A alfa și B beta, scindând legăturile arginil-glicinice și eliberând rapid fibrinopeptidul A și apoi fibrinopeptidul B. Astfel rezultă din fibrinogenul plasmatic monomeri de fibrină.

Faza de polimerizare: monomerii de fibrină se polimerizează neozimatic, spontan, cap la cap și lateral, formând un polimer fără legături covalente (fibrina S).

Faza de stabilizare: se caracterizează prin introducerea legăturilor covalente în structura polimerului S (solubil). Procesul are loc în prezența unei transglutaminaze (f. 8). Activată de trombină sau de F. Xa (în prezența Ca²⁺), enzima introduce legături izopeptidice între grupările epsilon-aminice ale lizinei și grupările gamma-carboxamidice ale glutaminei, cu eliminare de amoniac. Se stabilizează rapid dimerii gamma-gamma și apoi, mai lent, polimerii alfa.

proconvertina (F. VII) se completează, formând un complex dotat cu activitate enzimatică. Acesta, la rândul său, se fixează pe factorul Stuart-Power (F. X), trecându-l în forma activată (F. Xa), capabilă să activeze la rândul său proaccelerina (F. V) ce se adaugă complexului. Se formează astfel activatorul extrinsec, cu activitate protrombinazică. În acest complex, activitatea enzimatică se datorează F. Xa, restul factorilor jucând un rol de acceleratori ai procesului.

b) Călea intrinsecă. Factorul IIageman (F. XII) trece în forma activă printr-unul din mecanismele mai sus citate. În această formă el acționează asupra globulinei antihemofilice C (F. XI), pe care o activează.

D. Retractiva cheagului. După formarea trombusului de fibrină etas și solid ancorat se realizează retractiva acestuia, care asigură coeziunea de hemostază perfectă. Acest proces de retractiva este atribuit în bună parte trombocitelor ce ar acționa retrăgându-și pseudopodele. La acest proces participă trombostenina, ATP și retractivozimul plachetar.

Teoria autocatalizei (Seegers)

Porind de la cercetări *in vitro* asupra identității factorilor coagulării, Seegers și școala sa au ajuns de la jumătatea deceniului trecut la o ipoteză mult simplificată privind mecanismul coagulării (fig. 5.41).

Seegers consideră că protrombina este o proteină plasmatică labilă, capabilă, prin scindare autocatalitică (în prezența Ca²⁺, F. III și f. 3), să genereze nu numai trombină, ci și alți produși cu activitate enzimatică, pe care i-a numit autoprotoimbine. Aceștia, ca și trombina, acționează în *feed-back*, determinând scindarea a noi cantități de protrombină. Trombina astfel formată acționează asupra fibrinei în modul deja descris (vezi mai sus).

Conform acestei teorii, odată inițiată, coagularea intră într-un cerc vicios, ce nu poate fi întrerupt decât prin acțiunea factorilor anticoagulanți. Recent s-a demonstrat identitatea chimică dintre factorul VII și autoprotoimbina I, factorul IX și autoprotoimbina II, factorul X și autoprotoimbina Ic.

Controlul coagulării. Extinderea procesului de coagulare dincolo de limitele necesare, precum și coagularea intravasculară diseminată sunt prevenite prin intervenția a o serie de factori cu rol anticoagulant (fig. 5.42).

Fluxul sanguin. Torentul circulator contribuie prin efectele sale mecanice la fragmentarea fibrinei, care este ulterior distrusă. Pe de altă parte, îndepărtarea și diluția factorilor activați din zona interesată contribuie, de asemenea, la delimitarea procesului.

Clearance-ul factorilor activi. Factorii plasmatici activați în circulație sunt în permanență metabolizați și inactivați la nivel de ficat, sistem reticulo-endotelial și plămân. În felul acesta, se realizează o reducere a concentrației lor sub limita necesară evoluției extensive a coagulării.

Antitrombinele plasmatic. În plasmă s-a descris prezența a nouă factori sau activități cu rol antitrombinic (antitrombinele I-IX). Dintre acestea mai cunoscute sunt:

- antitrombina I, reprezentată, de fapt, de efectul trombin-adsorbant al fibrinei. Aceasta asigură inactivarea a 85-90% din trombina formată;

- antitrombina III este o alfa-globulină răspunzătoare de inactivarea progresivă a trombinei adsorbite de fibrină. Inactivează, de asemenea, factorii III, VII și X, precum și plasmă. Joacă rol de cofactor al heparinei;

- alfa₂-macroglobulin-inhibitorul reprezintă cca 25% din activitatea antitrombinică a plasmă. Inactivează trombina prin complexare ireversibilă;

- alfa₂-proteolitic-inhibitorul formează o fracție minoră a activității antitrombinice plasmatic.

Antifactorii plasmatici. Sunt inhibitori ai factorilor procoagulanți descriși mai sus. Numărul lor este relativ mare, dar identificarea lor este încă dificilă și incompletă.

Factorul X ar fi inhibat de autoprotoimbina IIa, antitrombinele II și III, heparină etc. S-au descris, de asemenea, doi inactivatori proteici (alfa₂-globuline) ai complexului tromboplastin plasmatic (F. Xa, V, IV, f. 3).

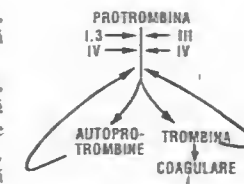


Fig. 5.41. Teoria coagulării (Seegers).

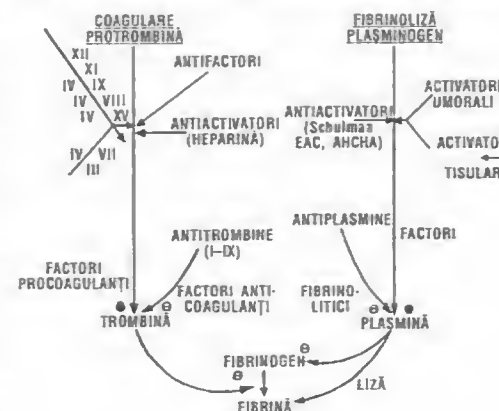


Fig. 5.42. Controlul coagulării.

Se citează numeroși inactivatori ai factorilor III, V, VII, VIII, XII. În același cadru se situează și activitatea anti-V și anti-VIII a concentrațiilor mari de trombină.

Heparina. Este un polizaharid conjugat produs în plămân și ficat. Este stocată și transportată de mastocite și polimorfonucleare bazofile. Acționează ca un antiactivator al protrombinei în prezența unui cofactor (antirombina III); favorizează, de asemenea, adsorbția trombinei pe fibrină. Este neutralizată de f. 4 plachetar, eliberat în momentul formării trombusului alb.

Sistemul fibrinolitic. Sistemul procoagulant, fibrinofactor descris mai sus, este dublat și limitat în acțiunea sa de existența unui sistem anticoagulant, fibrinolitic. Cele două sisteme sunt alcătuite din aceleași elemente de bază. Ambele se concentrează pe acțiunea exercitată asupra fibrinogenului sau fibrinei de către o enzimă ce rezultă din activarea unui precursor plasmatic inactiv.

Activarea precursorului este determinată și accelerată de factori plasmatici și umorali. Acțiunea acestora poate fi redusă sau blocată datorită existenței antiactivatorilor (antifactori). În fine, în ambele sisteme, activitatea enzimelor fibrinofomatoare, respectiv fibrinolitice, poate fi blocată prin antienzime specifice. Prin acțiunea lor conjugată și armonioasă, cele două sisteme limitează procesul de coagulare la dimensiunile strict necesare, fără a-i permite extinderea ce creează factori de risc pentru întregul organism.

Cuplul plasminogen-plasmină. Reprezintă echivalentul fibrinolitic al cuplului fibrinofomator protrombină-trombină. Plasminogenul este o euglobină plasmatică, cu Mr de 140 000, care se fixează în cantități mici de fibrină.

Prin activare, el eliberează plasmina, o enzimă proteolitică activă, ce hidrolizează fibrina formată, transformând-o în fragmente solubile. Plasmina are și capacitatea de a distruge fibrinogenul, precum și unii factori procoagulanți (V, VIII). Acțiunea sa hidrolitică a fost descrisă și în cazul factorilor din sistemul complement și al unor hormoni (STH, ACTH etc.). Prin aceste acțiuni, plasmina limitează extinderea trombusului de fibrină și previne coagularea intravasculară.

Factorii activatori ai plasminogenului (proactivatori). Transformarea plasminogenului în plasmină se realizează, sub acțiunea activatorilor specifici, în două etape. Într-o primă etapă, glutamin plasminogenul nativ, cu afinitate redusă pentru fibrină, este transformat în lizin plasminogen, cu afinitate crescută pentru fibrină. Acesta este scindat, fie prin acțiunea enzimatică a unor activatori (urokinază), fie prin acțiunea autocatalitică a unui compus activ, format prin cuplare cu alți activatori (streptokinază). În urma scindării, rezultă plasmina activă, ce acționează asupra fibrinei pe care s-a fixat (fig. 5.43).

S-au descris două tipuri de activatori: umorali (rapizi) și tisulari (lenți). Activatorul umoral se află în plasmă sub o formă de proactivator, fiind activat de lizokinaze eliberate din celulele endoteliale sub acțiunea unor factori declanșatori variați. S-a emis ipoteza că proactivatorul ar fi identic cu prekalicreina și că activarea sa ar avea loc sub acțiunea factorului XIIIa. În acest caz, activatorul plasmei ar fi însăși kalicreina sau factorul XIa. Acest mecanism ar reprezenta încă un aspect al cuplării multiple dintre coagulare și fibrinoliză. Activatorul tisular lent ar fi stocat în lizozomii din numeroase țesuturi (uter, prostată, tiroidă, suprarenale, plămâni etc.) și endoteliul vascular, de unde este eliberat de obicei în momentul distrucțiilor celulare.

Factorii antiactivatori. Acțiunea activatorilor este contracarată de prezența antiactivatorilor. Se cunosc o serie de antiactivatori naturali, cum ar fi factorul Schulman sau antistrepto- și antilizokinaza. Cercetările chimice și farmacologice au pus în evidență acțiunea antiactivatoare a unor produși naturali sau sintetici străini organismului, cum ar fi acidul epsilon-aminocaproic (EAC), inhibitorul din soia, acidul transamino-metilciclohexancarbazolic (AMCHA) etc. Acești produși, alături de cei purificați din plasmă, pot fi utilizați în controlul fibrinolizei la fel cum activatorii (în special streptokinaza) se utilizează în controlul trombozelor.

Factorii antiplasminici. Reprezintă echivalentul funcțional al antitrombinelor din sistemul procoagulant. S-au descris două antiplasmine. Una dintre acestea este o alfa₂-

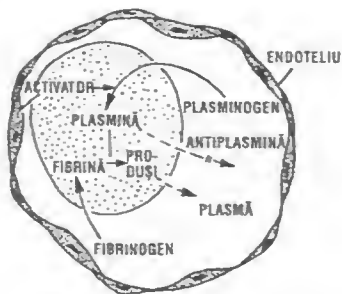


Fig. 5.43. Activarea locală a plasminogenului în zona cheagului de fibrină dintr-un vas mic (după Williams, 1972).

macroglobulină, sintetizată în ficat. Aflându-se în circulație, ea inactivează plasmina imediat după formare, nelăsându-i decât timpul necesar unei acțiuni locale limitate. O a doua antiplasmină are o acțiune lentă și este o alfa₂-globulină, sintetizată în pancreas și parotidă.

5.2.10.3. Tulburările hemostazei normale

Așa cum a reieșit din cele expuse, pentru desfășurarea normală a hemostazei sunt necesare: normalitatea peretelui vascular, a funcției trombocitare și a acțiunii celor două sisteme pro- și anticoagulant. Orice alicare a acestor condiții determină tulburări de hemostază cu grave repercusiuni locale și generale.

Perturbări de natură parietală: apar fie în alterări locale ale peretelui vascular (telangiectazii etc.) sau prin alterări generale ale rezistenței și permeabilității peretelui capilar (fragilitatea vasculară ereditară, diabetică, scorbutică). Se însoțesc de obicei de mici hemoragii externe sau intratisulare locale (epistaxis) sau extinse (peteșii, purpură). Din aceeași categorie fac parte hemoragiile prin lezarea mecanică, traumatică a vaselor. Leziuni vasculare pot apărea și sub acțiunea unor agenți agresori, cum ar fi cei microbieni (streptococ), toxici (arsenic, sulfamide), histamina. Sunt frecvente, de asemenea, lezările prin agenți imunologici, acționând în cadrul reacțiilor alergice și anafilactice. Tulburările, în cazul în care nu sunt evidente, pot fi obiectivate și prin proba Rumpel-Leede.

Perturbări de natură trombocitară: trombopeniile (sub 150 000/mm³) se însoțesc în mod obișnuit de tulburări hemoragice (purpură). Ele pot apărea fie prin defect de producere (congenital, toxic, infecțios etc.), fie prin exces de distrugere (hipersplenism, traumatisme chirurgicale, intoxicații etc.). Tulburări hemoragice pot apărea și în situația unor modificări ale capacității funcționale trombocitare (trombopatii, trombastenii), manifestate mai ales prin lipsă de adezivitate plachetară, deficit de factor 3, fragilitate.

Perturbări prin deficite ale factorilor coagulării: deficitul ereditar de factor VIII și, mai rar, de factor IX determină hemofiliile A și, respectiv, B. Alături de aceste forme hemoragice majore s-au descris și așa-zisele pseudoemofilii prin deficit de factor XI (hemofilia C) sau XII.

Deficite pot apărea și în cazul protrombinei, factorilor V, VII, X, XIII. Aceste deficite, ca și cele ale fibrinogenului, pot sta la originea diverselor sindroame hemoragice.

Perturbări prin disfuncția sistemului fibrinolitic: fibrinoliza exagerată, cauzatoare de hemoragii, poate apărea în stările de stres (emoții, oboseală), în intervenții chirurgicale, insuficiențe hepatice, accidente transfuzionale, supradozaj de medicamente etc. (fig. 5.44).

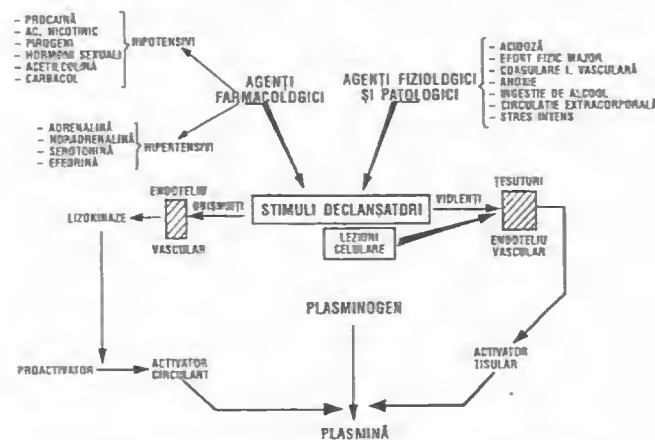


Fig. 5.44. Factorii fizio-farmacologici cu rol în declanșarea fibrinolizei.

Un aspect deosebit este prezentat de coagularea intravasculară diseminată. Aceasta apare în alerăriile endotelului capilar (traumatisme, arterite), stază capilară (insuficiență cardiacă, varice) prezența unor factori trombotici (hiperfibrinemie, AGL, acid lactic, ADP, veninuri etc.). Într-un prim moment, se formează mici agregate trombotice diseminate datorate activării difuze a trombinei. Consumul excesiv de factor procoagulant determină, într-o a doua fază, apariția unei hipocoagulabilități, urmată de o fibrinoliză exagerată. În acest cadru, apar tulburări hemoragice diseminate de o gravitate deosebită.

5.2.10.4. Explorarea hemostazei și fibrinolizei

Metodele de explorare a hemostazei și fibrinolizei sunt numeroase, mai ales datorită complexității mecanismelor ce antrenează o multitudine de factori. Aceste metode cuprind investigarea principalelor etape ale coagulării (vasculare, trombocitare, plasmatică), precum și ale fibrinolizei.

Teste de fragilitate capilară. Principiu: se apreciază oumărul de peteșii formate la nivelul plicii cotului fie după aplicarea unei veniuzi, fie după aplicarea timp de 5 minute a unei presiuni (egale cu T.A. medie) cu ajutorul unui manșon pneumatic. Rezultate: se exprimă în număr de peteșii pe o arie circulară ($r = 20$ mm). Normal – până la 10; slab pozitiv (+); pozitiv (++) : 20–30; pozitiv (+ + +) : 30–40; intens pozitiv (++++): 30–50 de peteșii.

Teste trombocitare. 1. *Număratoarea trombocitelor.* Principiu: se realizează direct în hemocitometru. Valori normale: $250\,000 \pm 50\,000/\text{mm}^3$ sânge.

2. *Adezivitatea plachetară (retenția plachetară).* Principiu: se măsoară scăderea oumărului de trombocite după trecerea sângelui nativ sau cu anticoagulant pe o suprafață străină în condițiile standard stabilite pentru fiecare laborator.

3. *Disponibilitatea de factor 3 plachetar.* Principiu: se măsoară timpul de coagulare a plasmelor îmbogățite în trombocite incubate cu o suspensie de caolin.

4. *Retracția cheagului.* Principiu: se măsoară volumul procentual de lichid expulzat dintr-un cheag de plasmă în timp de o oră. Valori normale: peste 85%.

5. *Agregabilitatea plachetară.* Principiu: se înregistrează dinamica agregării trombocitelor în plasma îmbogățită cu plachete, în comparație cu un subiect normal. Agregarea se induce fie direct (adăugare de ADP), fie indirect (soluție de collagen). Măsurarea se face fotoelectric într-un agregometru înregistrator.

6. *Testul Biggs-Douglas.* Principiu: se măsoară timpul de coagulare a plasmelor normale din momentul punerii în contact cu un sistem format din plasmă adsorbită și ser normal cu suspensie plachetară de cercetat, incubate cu CaCl_2 . Rezultate: 8–12 s (pentru o incubare de 9 min).

7. *Timpul de sângerare.* Principiu: se măsoară timpul de sângerare la nivelul unei incizii standard a zonei mediane a lobului urechii. Rezultate: normal: 2–4 minute; patologic: peste 6 minute (între 4 și 6 minute se repetă).

Teste de investigare a timpului plasmatic al hemostazei.

a) Metode globale (screening):

1. *timpul de coagulare a sângelui total.* Principiu: se măsoară timpul de coagulare a sângelui *in vitro* (eprobiță, lamă, capilare etc.). Valorile diferă în funcție de metodă;

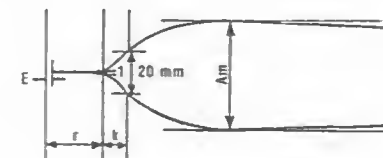
2. *timpul Howell.* Principiu: se măsoară timpul de coagulare a plasmelor oxalate, bogată în trombocite după recalcifiere. Apreciază atât funcția trombocitară, cât și activitatea factorilor plasmatici. Rezultate: 60–120 s (eprobete obișnuite, plasmă bogată în trombocite);

3. *testul de toleranță la heparină.* Principiu: se măsoară timpul de coagulare a plasmelor recalcificate în prezența heparinei. Rezultate: la 0,5 U.H. timpul de coagulare este de 4 ori timpul Howell. Scăderi cu peste 25% sunt semnificative pentru prezența unei hipocoagulabilități;

4. *consumul de protrombină.* Principiu: se măsoară timpul de coagulare a plasmelor normale în prezența unui amestec de ser de cercetat, tromboplastină și Cl_2Ca . Rezultate: valorile peste 45 de secunde sunt normale. Valorile mai reduse indică remanența protrombinei neconsumate în serul de cercetat, care este probabil deficient în protrombină;

5. *trombelastografia.* Principiu: este o metodă de determinare a coagulabilităților globale și fibrinolizei, care permite aprecierea cineticii de formare și calității cheagului sanguin pe baza unor parametri specifici (fig. 5.45). Valorile normale sunt prezentate, în mare, în tabelul alăturat (tabelul 5.IV).

Fig. 5.45. Trombelastograma cu parametri clasici. E, timpul de umplere. r, timpul de reacție. k, viteza de reacție trombină – fibrinogen. Am, amplitudinea maximă.



TABELUL 5.IV

Parametrii trombelastografiei în cazul sângelui uman integral nativ (după Piepce și colab., 1979)

Limita de hipocoagulare	Simbol	Parametru	Limita de hipercoagulare
20	r	Perioada de reacție	10
25	a	Parametru cantic al coagulării	30
10	X_c	Abscisa centrului trombotinamic	5
6	y_c	Ordonata centrului trombotinamic	8
300		Parametru ritmului de coagulare	75
44°		Trombotinosis	55°
0,94	tg	Viteza maximă a coagulării	1,45
100	x_m	Abscisa punctului de coagulare maximă	50
179°		Unghiul de relaxare a cheagului	177°
0,01	tg	Viteza de relaxare a cheagului	0,05
12 min	K	Viteza de coagulare	7 min
40 mm	A_m	Amplitudinea maximă	60 min
80	E_m	Elasticitatea maximă	150

b) Metode de explorare a căii extrinseci:

1. *timpul Quick (TQ).* Principiu: se determină timpul de coagulare a plasmelor oxalate (săracă în trombocite), în prezența unui exces de tromboplastină tisulară și calciu. Se oculesc astfel factorii sistemului intrinsec (VIII, IX, XI și XII). Valori: 13–15 s (sau 90–100% față de plasma normală). Depășirea acestor valori indică existența unui deficit de F. VII atunci când calea intrinsecă se dovedește a fi normală;

2. *metode specifice.* Principiu: alungirea timpului Quick indicând un deficit al căii extrinseci; activitatea specifică a oricărui dintre factorii implicați (II, V, X) poate fi stabilită făcând să varieze doar compoziția reacțiilor. La plasma de cercetat se adaugă toți factorii, cu excepția celui de cercetat. Dacă timpul de coagulare se normalizează, este de presupus că plasma de investigat nu prezintă un deficit al factorului în cauză.

c) Metode de explorare a căii intrinseci:

1. *timpul de tromboplastină parțială (PTT)* (fig. 5.46). Principiu: este un test global intrinsec și reprezintă timpul de coagulare a plasmelor sărace în trombocite, din momentul adăugării de cefalină din creier uman (suspensie 1%) și calciu. Valori: 70–110 s;

2. *timpul de tromboplastină parțială activat (PATT).* Principiu: este PTT al unei plasmă activate prin adăugare de caolin. Valori: 45–60 s;

3. *metode specifice.* Ca în cazul căii extrinseci, este posibilă determinarea specifică a factorilor V, VIII, IX, X, XI și XII utilizând succesiv sisteme de reacție în care se introduc din afară toți factorii, cu excepția celui de investigat.

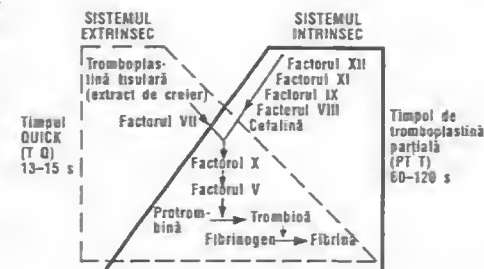


Fig. 5.46. Factorii implicați în determinarea timpului de coagulare (timpul Quick) și a timpului de tromboplastină parțială (PTT).

FIZIOLOGIE SPECIALĂ

6. FIZIOLOGIA INIMII

Aparatul cardio-vascular, reprezentat de inimă, artere, capilare și vene, asigură deplasarea sângelui la nivelul țesuturilor și organelor în vederea realizării schimburilor nutritive și respiratorii celulare și a îndepărtării produșilor toxici de degradare. Inima ca organ propulsor prevăzut cu un sistem propriu de aprindere, generator de contracții ritmice autoîntreținute, îndeplinește rolul unei veritabile motopompe biologice ce furnizează energia necesară deplasării sângelui în circuitul închis al mării și micii circulații. La rândul lor, arterele, arteriolele, capilarele, venulele și venele formează o vastă rețea de tuburi elastice cu structură și funcții diferite, ce vor fi prezentate în subcapitolele consacrate circulației arteriale, capilare și venoase.

Marea și mica circulație, fiind dispuse în serie, funcționează în regim presional diferit și îndeplinesc roluri fiziologice distincte. În cazul mării circulații (sistemice), sângele parcurge circuitul: ventricul stâng-artere-arteriole-capilare-venule-vene-atriu drept, prezentând trei segmente – de distribuție (ventricul stâng, aortă și ramurile sale), de schimb (capilare și venule) și colector (vene și atriu drept). Mica circulație asigură deplasarea sângelui din ventriculul drept la plămâni prin arterele pulmonare și înapoi în atriu stâng prin venele pulmonare. Pe plan funcțional, aparatul cardio-vascular asigură transportul de substanțe nutritive și dăunătoare, participă la procesele de adaptare și apărare ale organismului și coordonează funcțiile somato-vegetative cu ajutorul factorilor umorali activi din plasmă, în vederea asigurării echilibrului homeostazic.

6.1. PARTICULARITĂȚILE MORFO-FUNCȚIONALE ALE INIMII

Inima este un organ musculo-cavitar globulos, care îndeplinește atât un rol de rezervor sanguin, cât, mai ales, rolul de pompă aspiro-respingătoare, cu activitate ritmică sistolo-diastolică. Ea are importanță esențială în asigurarea diferențelor de presiune necesare circulației sângelui în arborele vascular (fig. 6.1).

În scară animală, acest organ circulator central evoluează treptat, de la forma simplă a unui tub muscular, la forme din ce în ce mai complexe, prevăzute cu atrii și ventricule, în care apar ulterior septuri mediane. Acestea separă cordul drept, în care circulă sânge venos, de cordul stâng, care pompează sânge arterial. Separarea completă a inimii drepte de cea stângă și, prin urmare, a mării circulații de mica circulație apare la păsări și mamifere. Etapele acestei evoluții filogenetice pot fi regăsite și în evoluția ontogenetică a embrionului uman. La acesta, inima se dezvoltă din doi muguri mezodermici simetrici, situați de o parte și de alta a extremității orale a conului primitiv. Inițial se dezvoltă conul ventricular, care își începe activitatea contractilă odată cu începerea formării atriolelor, urmată de formarea sinusului venos. Acesta preia controlul ritmului cardiac înaintea apariției sistemului conductor sau a fibrelor nervoase în interiorul organului.

Inima este alcătuită din trei structuri distincte, ce se suprapun de la exterior spre cavitatea centrală: pericardul, miocardul și endocardul.

Pericardul este un sac dublu, în care se află câțiva cm³ de lichid seros, cu rol de lubrifiere. Are și rolul de a limita expansiunea și umplerea diastolică, mai ales a ventriculului drept, protejând astfel circulația pulmonară împotriva unei eventuale supraîncărcări (congestie). Pericardul servește și ca suport pentru atrii,

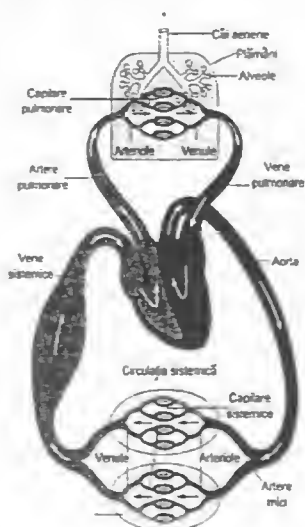


Fig. 6.1. Reprezentarea schematică a marii și mici circulații, indicând sectoarele distensibile și de rezistență (modificat după Guyton, 1976).

care constituie: pompe ce utilizează energia eliberată de ATP pentru a mișca moleculele împotriva gradientelor electro-chimice, dispozitive de schimb (*exchanger*), care folosesc energia gradientelor existente pentru a transporta anumite molecule una câte una, canale constituite din pori cu o anumită selectivitate pentru diferiți ioni pe care îi transportă folosind gradientele existente.

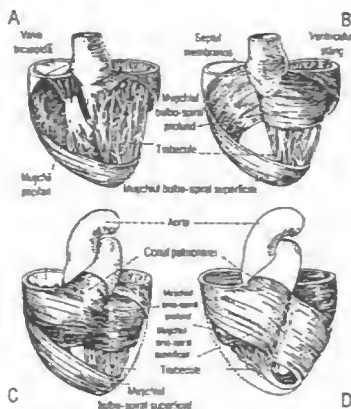


Fig. 6.2. Anatomia funcțională a cordului uman. A, Mușchiul bulbo-spiral superficial formează învelișul extern al porțiunii drepte și stângi a ventriculelor până la apex. B, Mușchiul bulbo-spiral profund înfășoară porțiunea bazilară a ventriculului stâng. C, Mușchiul sino-spiral profund încercuiește camerele ventriculare dreaptă și stângă. D, Mușchiul sino-spiral superficial reprezintă contrapartea mușchiului bulbo-spiral superficial (după Rushmer, 1976).

impiedicând regurgitarea sângelui din ventricule în auricule în cazul unor presiuni sistolice ventriculare deosebit de ridicate.

Miocardul este constituit, la rândul său, din fibre musculare cardiace, un sistem excito-conductor și un schelet fibros care, împreună cu endocardul, participă la formarea sistemului valvular.

Fibrele musculare cardiace sunt dispuse în straturi suprapuse, ancorate de scheletul fibros. La nivelul atriilor se descriu două straturi atât de subțiri, încât mușchiul atrial este translucid: un strat înconjoară complet ambele atri, în timp ce al doilea, dispus perpendicular pe primul, este independent pentru fiecare atriu. La nivelul ventriculelor se descriu patru sisteme de fibre musculare:

- sistemul sino-spiral superficial, cu originea și inserția pe inelul tricuspidei;
- sistemul bulbo-spiral superficial, cu ambele inserții pe inelul mitralei;
- sistemul sino-spiral profund, care înconjură ambele ventricule;
- sistemul bulbo-spiral profund, care înconjură doar ventriculul stâng.

Aceste sisteme de fibre (fig. 6.2. A, B, C, D) acționează în sensul reducerii diametrelor longitudinale și, mai ales, transversale ale cavităților ventriculare în timpul sistolei.

Fibrele ce intră în alcătuirea țesutului muscular cardiac au diametrul de cca 15-25 μm , lungimea de 150 μm și un aspect striat, identic cu cel al mușchiului scheletic. Ele sunt delimitate de o membrană celulară, sarcolema.

Sarcolema are o grosime de 7-9 nm și este alcătuită dintr-un strat dublu fosfolipidic, în care sunt inserate molecule proteice

Canalele joacă un rol important în controlul fenomenelor electrice celulare, funcționarea lor fiind dependentă de voltaj sau de numeroși liganzi reprezentați de hormoni, neurotransmițători, Ca^{2+} .

Membrana mai conține enzime (ATPaza, adenil ciclaza), a căror activitate poate fi afectată în unele condiții patologice, cum ar fi stările de ischemie-reperfuze, insuficiența cardiacă.

Receptorii membranari reprezintă dispozitive moleculare proteice, specializate pentru interceptarea semnalelor transmise de diferite substanțe active.

În zona internă a membranei sunt situate proteinele G, denumite astfel pentru că se leagă de guanin nucleotizi, constituite din 3 subunități α , β , γ . Cele mai importante proteine G sunt G_s (stimulatoare), G_i (inhibitoare) sau G_q .

Activarea proteinelor G duce la influențarea activității unor canale ionice (canale de K^+ sau Ca^{2+}) sau a unor enzime (adenil ciclaza, fosfolipaza C).

Structura specifică a membranei asigură transportul diferitelor substanțe la nivel celular. Transportul pasiv are loc în sensul gradientelor electro-chimice, în timp ce pentru transportul activ împotriva acestor gradient este necesară intervenția unor pompe, cum ar fi pompa de Na^+K^+ , care asigură menținerea compoziției ionice a celulelor prin expulzarea a 3 Na^+ contra 2 K^+ pentru fiecare moleculă de ATP desfăcută.

Fibrele miocardice prezintă zone de apozitie strânsă, numite discuri intercalare.

Discurile au o porțiune transversală, dispusă în unghi drept, cu axul longitudinal al fibrelor musculare la extremitățile celulei, la nivelul unei linii Z. Aceste zone au adesea o dispoziție în zig-zag. Porțiunile transversale învecinate sunt frecvent conectate prin segmente longitudinale, ce se întind în lungul sarcomerului până la următoarea linie Z. Caracterul de sincițiu funcțional, electric și mecanic al țesutului miocardic este asigurat prin rezistență electrică extrem de scăzută și legăturile intercelulare ferme realizate la nivelul discurilor intercalare. La nivelul acestor structuri, s-au descris trei tipuri de specializări jonctionale:

- *macula adherens* (desmosomi), care asigură adeziunea strânsă între celulele adiacente longitudinale;
- *fascia adherens*, care ocupă majoritatea porțiunii transversale a discului și la nivelul căreia se inseră filamentele subțiri de actină ale ultimului disc clar, împreună cu desmozomii, aceasta asigură solidaritatea mecanică a fibrelor adiacente;
- *nexusul* (joncțiunea strânsă), ce se găsește în partea laterală a discului, nu oferă inserție filamentelor contractile și pare a se afla în afara direcției de exercitare a forței mecanice. La acest nivel, apozitia membranară este foarte strânsă și există o rețea de canale care traversează ambele membrane și care constituie conexonii. Aceștia sunt alcătuiți din proteine numite conexine care pot fi de mai multe tipuri, ceea ce are importanță în determinarea vitezei de conducere în miocard.

Viteza de conducere în sens longitudinal de la o fibră la alta este de două ori mai mare decât viteza de conducere în sens transversal, tocmai datorită conexonilor.

Fibra musculară cardiacă conține câțiva nuclei situați central, în sarcoplasmă. Aparatul metabolic energoformator, reprezentat de mitocondrii, este deosebit de dezvoltat. Mitocondriile ocupă cca 30-40% din volumul celulei. Aparatul contractil al fibrei miocardice (fig. 6.3 A, B, C, D) reprezintă cca 50% din volumul celulei și are o structură asemănătoare cu cea observată în mușchiul scheletic. Miofilamentele groase, de miozină, și subțiri, de actină, sunt grupate în discuri (benzi) întinse (anizotrope-A) și, respectiv, clare (izotrope - I). În centrul discurilor clare se află membrana Z, care se continuă transversal până la nivelul sarcolemei, servind ca zonă de ancorare a filamentelor de actină și separând sarcomerele între ele. În centrul discului întinse se află stria clară (stria Hensen - H), ce marchează centrul sarcomerului, zona în care nu se formează punți transversale acto-miozinice. În afara aparatului metabolic și al celui contractil, o semnificație morfo-funcțională deosebită la nivelul fibrei musculare cardiace o au două tuburi longitudinale. Ansamblul format dintr-un tub în „T” și cele două cisterne care îl mărginesc este numit *triadă* și are o semnificație deosebită în procesul cuplării excitației cu contracția (fig. 6.3 A, B, C) datorită intervenției în transportul, legarea și depozitarea Ca^{2+} . Eliberat de la acest nivel, Ca^{2+} poate ajunge rapid la miofibrile, unde reacționează cu sistemul troponin-tropomiozină cu efecte asupra contracției. În reticul există un canal de Ca^{2+} care poate fi activat de pătrunderea acestuia în interiorul celulei. Reticulul sarcoplasmatic participă și la relaxare prin pomparea activă a Ca^{2+} din zona miofilamentelor cu ajutorul unei pompe de Ca^{2+} .

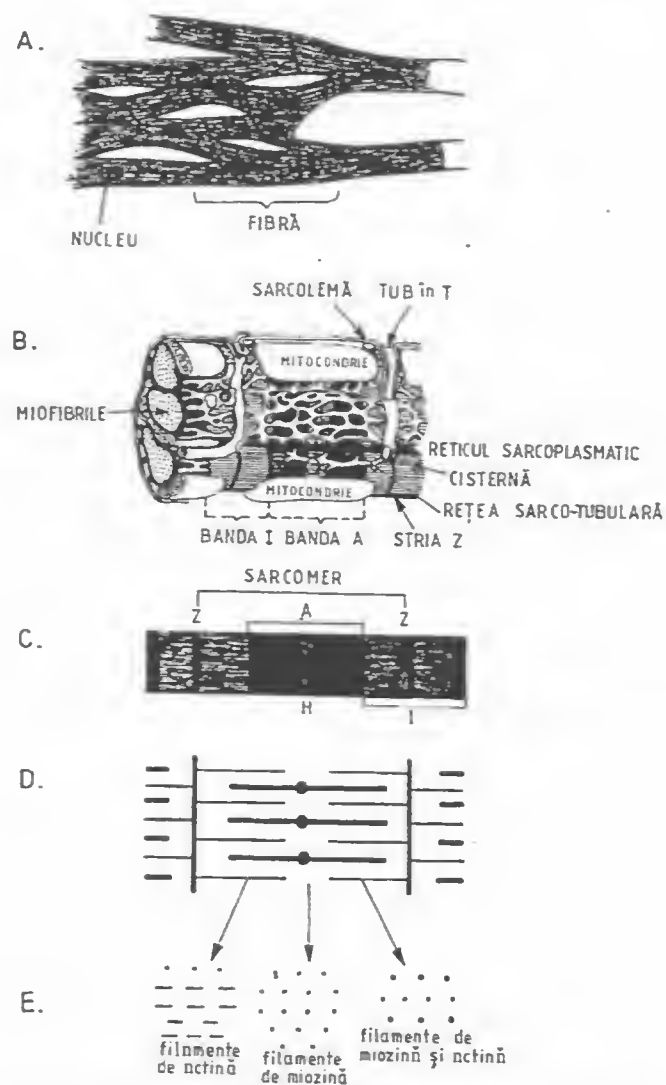


Fig. 6.3. Structura și ultrastructura fibrei miocardice. A: Țesutul miocardic. B: Ultrastructura fibrei miocardice. C: Sarcomerul, reprezentat schematic. D, E: Secțiuni transversale prin sarcomer.

Sistemul autonom excito-conductor cardiac este ansamblul anatomo-histologic intracardiac implicat în inițierea și propagarea impulsului sistolic. În componența sa, s-au individualizat următoarele structuri (fig. 6.4):

– *Nodulul sinusal Keith și Flack* (1906), considerat un rest embrionar din sinusul venos, are la om o grosime de cca 2 mm și o lungime de cca 2 cm, fiind situat între vena cavă superioară și atriu drept, în sulcus terminalis. Este format dintr-o aglomerare centrală de celule nodale (P), de dimensiuni reduse, de formă rotunjită, ovalară, cu aspect palid, lipsite de elemente contractile, în strâns contact și dotate cu automatism. Nodulul mai conține celule de tip intermediar (tranziționale) fusiforme, cu rare elemente contractile, și contacte de tip nexus, precum și celule miocardice propriu-zise. Nodulul este vascularizat de artera sinusală, ram din coronara dreaptă, și conține fibre simpatice și parasimpatice din vagul drept.

Nodulul sinusal îndeplinește rol de generator electric primar, care impune ritmul fiziologic al bătăilor cardiace.

– *Nodulul atrio-ventricular Aschoff-Tawara* (1892) este situat subendocardic, în partea dreaptă și posterioară a marginii inferioare a septului interatrial, lângă orificiul sinusului coronar. Este situat deasupra barierei transversale fibroase a inimii, reprezentând singura posibilitate de contact atrio-ventriculară. Fibrele musculare atriale din regiunea sinusului coronar se adună în evantai, se împletesc și se unesc cu regiunea superioară a nodulului.

Nodulul atrio-ventricular este format din celule asemănătoare celor din nodulul sinusal (celule P, celule tranziționale, fibre miocardice), la care se adaugă și celule de tip Purkinje mult alungite, ramificate, cu rol de conducere. Vascularizația este asigurată de artera coronară dreaptă, iar inervația din fibre parasimpatice din vagul stâng.

S-a descris existența unor căi preferențiale de conducere a impulsurilor de la nodulul sino-atrial la cel atrio-ventricular. Deși nu au fost identificate histologic, aceste căi internodale, cu viteză de conducere mare, au fost bine caracterizate funcțional. S-au descris trei fascicule internodale (anterior, posterior și mijlociu), dintre care cel anterior (Bachmann), situat la marginea anterioară a septului interatrial, are rol în asigurarea sincronizării interatriale. Este posibil ca viteza mare de conducere în aceste zone să se datoreze orientării fibrelor miocardice, cu diametrul longitudinal paralel cu axa internodală și nu transversal pe acestea.

În afara nodulului atrio-ventricular, la unele persoane poate apărea un fascicul atrio-ventricular suplimentar. Această anomalie realizează o cale de conducere atrio-ventriculară prin care impulsul de contracție se propagă spre ventricule mult mai rapid decât prin căile normale, unde propagarea este întârziată la nivelul nodulului atrio-ventricular. În aceste condiții, depolarizarea și sistola ventriculară au loc practic simultan cu sistola atrială, umplerea ventriculară fiind afectată (sindrom de preexcitare Wolf-Parkinson-White – W.P.W.).

– *Fasciculul His* continuă extremitatea ventriculară a nodulului atrio-ventricular. Trunchiul comun (lungime 20 mm, lățime 1–2 mm) se îndreaptă spre marginea posterioară a părții membranoase a septului interventricular și de aici în jos și înainte, spre marginea anterioară, fiind inclus și izolat într-un canal. În partea anterioară a septului, înaintea zonei de inserție a cupei septale a valvei tricuspide, pe inelul fibros

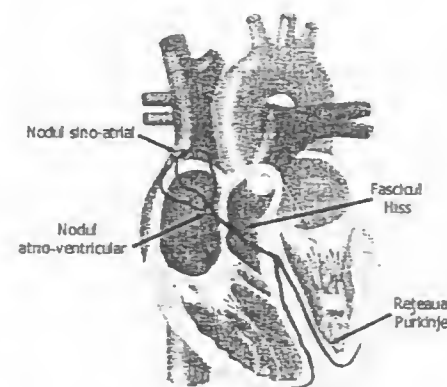


Fig. 6.4. Sistemul excito-conductor cardiac.

atrio-ventricular, fasciculul se bifurcă. Ramul stâng perforază membrana și se așează pe marginea superioară a septului muscular. Intrând în spațiul subendocardic al ventriculului stâng, îndărătul unirii cupei anterioare și cupei posterioare drepte a valvei aortice, se divide în două ramuri (anterior și posterior). Ramul drept coboară pe partea dreaptă a septului și ajunge în spațiul subendocardic drept, mai jos decât în cazul ramului stâng. Fasciculul este format predominant din celule Purkinje mari (până la 46 μ m lungime), cu puține miofibrile și multă sarcoplasmă, ce conține cantități mari de glicogen. Celulele dezvoltă conexiuni strânse cu fibrele subendocardice.

– *Rețeaua Purkinje*: ambele ramuri ale fasciculului His se continuă cu o rețea subendocardică de fibre Purkinje, ale cărei ramuri terminale pătrund în miocard.

Endocardul tapetează cavitățile atriale și ventriculare, asigurând netezimea suprafețelor ce vin în contact cu sângele circulant. El este alcătuit din trei straturi: primul strat, intern, este format din celule endoteliale care se continuă cu endoteliul vascular; stratul mijlociu, reprezentat de fibre colagene, elastice și musculare, adăpostește țesutul nodal cardiac; stratul extern, format din țesut conjunctiv lax, este adiacent miocardului și se continuă cu endomisul fibrelor musculare cardiace.

În general, endocardul atrial este mai gros decât cel ventricular. La nivelul orificiilor atrio-ventriculare și originii marilor artere de la baza inimii, foia endocardică se răsfrânge pe scheletul fibros al valvulelor cardiace.

Integritatea structurală a endocardului previne depunerea fibrinei și formarea de trombusuri la nivelul cavităților inimii, care, prin deplasare, pot obstrua diferite trunchiuri arteriale. Lipsa suprafețelor rugoase constituie condiția obligatorie a hemodinamicii cardio-vasculare normale.

Sistemul valvular cardiac este format dintr-un schelet fibro-conjunctiv inserat la nivelul orificiilor atrio-ventriculare și al marilor vase și acoperit de endoteliul endocardic. Marginea liberă a valvulelor (cuspid) este bogată în substanță fundamentală, cu rol important în asigurarea plasticității sistemului valvular. Valvulele cardiace îndeplinesc rolul unor veritabile palete de dirijare a sângelui într-un singur sens. Ele snt de două feluri: atrio-ventriculare și semilunare (aortice și pulmonare). Ambele tipuri de valvule se închid și se deschid pasiv sub influența diferențelor de presiune sistolo-diastolică, asigurate de pompa aspiro-respiratorie cardiacă.

– *Valvulele atrio-ventriculare stângi* sunt în număr de două, situate antero-lateral și postero-lateral, delimitând orificiul mitral (bicuspidian), cu suprafața medie de 3–4 cm². Fiecare din cele două valvule are o față ventriculară, pe care se inseră cordajele tendinoase ale mușchilor papilari, și o față atrială, în raport cu atrul stâng. Închiderea lor în timpul sistolei ventriculare împiedică refluxarea sângelui în atriu. În timpul diastolei, cuspidul valvulelor plutesc în torentul sanguin atrio-ventricular fără a opune vreoz rezistență deplasării sângelui din atrul stâng în ventriculul respectiv.

Cordajele limitează deplasarea exagerată a valvulelor spre atriu, asigurând etanșizarea închiderii valvulare.

– *Valvulele atrio-ventriculare drepte* sunt în număr de trei (anterioară, posterioară și internă) și delimitază orificiul tricuspidian. Prezentând aceleași fețe și cordaje ca și valvula mitrală, închiderea și deschiderea lor se realizează prin mecanisme pasive, similare cu ale acesteia, deși gradientele de presiune sistolo-diastolică sunt mult mai mici la nivelul cordului drept. În general, atât stenozele, cât și insuficiențele valvulare atrio-ventriculare afectează performanțele motopompei cardiace, alterând profund hemodinamica marii și micii circulații.

– *Valvulele semilunare aortice și pulmonare* sunt identice, fiecare dintre ele fiind alcătuită din trei cuspid dispuse în „cuib de rândunică”. Îndărătul valvei semilunare aortice se găsește dilatația sinusului Valsalva, care evită astuparea ostiului coronarian de către cuspidul valvulare. Închiderea și deschiderea valvulelor semilunare se realizează prin mecanisme pasive asemănătoare celor de la nivelul valvulelor atrio-ventriculare. Ca și acestea, cuspidul semilunare flotează în curentul sanguin în cursul sistolei, fără a opune vreoz rezistență eiecției sistolice, pentru ca în diastolă să se închidă, ca urmare a tendinței de refluxare a

sângelui spre ventricule. Datorită diferențelor mari de presiune dintre acestea și arterele emergente (aortă și pulmonare), atât eiecția sângelui, cât și închiderea valvulelor semilunare sunt mai rapide, cu un grad de uzură mult mai mare.

În afara rolului hemodinamic de asigurare a scurgerii sângelui într-un singur sens în timpul revoluției cardiace, închiderea valvulelor atrio-ventriculare și semilunare participă la producerea zgomotelor cardiace, respectiv a zgomotului I – sistolic, în cazul primelor, și a zgomotului II – diastolic, în cazul valvulelor aortice.

Venele cave și pulmonare deși nu prezintă un sistem valvular, cantitatea de sânge refluxată din auricule în timpul sistolei auriculare este neglijabilă.

6.1.1. PARTICULARITĂȚI ALE METABOLISMULUI MIOCARDULUI

Metabolismul miocardului este perfect adaptat necesităților funcționale ale inimii, știut fiind că acest organ se contractă și se relaxează ritmic toată viața. Astfel, în cardiomiocite se desfășoară procese metabolice foarte complexe, cu o plasticitate funcțională deosebită, în vederea adaptării la necesitățile necontenit variabile ale organismului. Caracteristicile fundamentale ale metabolismului cardiac sunt:

– preponderența reacțiilor aerobe generatoare de substrat energetic. Ca urmare, cardiomiocitul este perfect diferențiat în acest sens, având în structura sa un număr mare de mitocondrii dense electronomicroscopice și un conținut bogat în mioglobină. Densitatea sporită electronomicroscopică a mitocondriilor reflectă conținutul bogat în enzime ce intervin în procesele de fosforilare oxidativă, iar conținutul bogat în mioglobină asigură un rezervor important de oxigen. În consecință, enzimele glicolitice sarcoplasmice au o activitate redusă, iar saturația în oxigen a sângelui venos coronarian este foarte scăzută;

– activitatea ritmică a inimii pe tot parcursul vieții face ca, în condiții normale, în cardiomiocite procesele anabolice (de sinteză) proteice, lipidice și glucidice să fie, deci, puțin active.

Orice modificare a activității inimii reclamă o adaptare a metabolismului cardiac la necesitățile nou create. Aceste procese de adaptare se realizează prin mecanisme de *feed-back* negativ intracelular care mențin producția energetică la nivelul cerut prin modificarea adecvată a fluxului sanguin coronarian și deci a aportului de substrat și oxigen în funcție de necesități. O creștere a activității inimii, spre exemplu, va induce o creștere a consumului de oxigen ca urmare a intensificării ciclului acizilor tricarboxilici. Acest răspuns prin *feed-back* a metabolismului cardiac este declanșat de creșterea concentrației ADP extramitocondrial, ca urmare a intensificării utilizării ATP.

Energia necesară pentru activitatea miocardului este furnizată de ATP și este pusă la dispoziție prin ruperea legăturilor macroergice din constituția sa pentru a fi convertită în energie mecanică (contractie) și căldură și consumată de procesele de transport activ transsarcolemal și pentru activarea unor enzime. ATP astfel consumat este rapid refăcut din fosfocreatină (CF), care se află, de altfel, în echilibru cu ATP rezultat pe cale oxidativă. Sinteza de ATP se realizează ca urmare a energiei puse la dispoziție de numeroase reacții biochimice pe care le suferă diverse substanțe.

Miocardul are posibilitatea de a-și alege substratul energetic în funcție de circumstanțele fiziologice (necesități extemporanee, starea de nutriție, influențe neuro-reflexe și umorale etc.) sau patologice.

Substratul de elecție pentru metabolismul cardiac în condiții de normoxie îl constituie acizii grași neesterificați preluați din sângele coronarian. Aceștia asigură 60–70% din energia necesară inimii în condiții fiziologice. Aproximativ 15–20% din energia necesară inimii în condiții fiziologice o oferă glucoza, iar acidul lactic o cantitate (15%) aproximativ egală cu glucoza. Acizii aminați, corpii cetonici și acidul piruvic pot reprezenta sursă de energie pentru miocard, dar în cantitate nesemnificativă.

Dinamica proceselor energetice ou diferă de a celorlalte tipuri de celule musculare și poate fi etapizată în:

- generarea energiei biologice potențiale, ca urmare a derulării reacțiilor metabolice pe care le suferă diferite tipuri de substrat, în special de la nivelul mitocondriilor;
- stocarea energiei eliberate în cursul degradării substanțelor organice, sub forma legăturilor fosfat macroergice în moleculele de ATP și CF;
- utilizarea energiei prin ruperea legăturilor macroergice din molecula de ATP, pentru procesele de transport activ, contracție etc.

Captarea substratului de către cardiomiocit. Combustibilul de preferință pentru cardiomiocit este reprezentat de acizii grași liberi (neesterificați). Preluarea acestora de către cardiomiocit se realizează prin procese de transport pasiv, de unde și dependența de fluxul sanguin al satisfacerii necesităților cu această substanță. Fluxul sanguin miocardic al acizilor grași neesterificați depinde, pe de altă parte, de două variabile:

- concentrația plasmatică a acizilor grași neesterificați și,
- hemodinamica coronariană.

Concentrația plasmatică a acizilor grași neesterificați variază însă suficient de mult în funcție de perioadele prandiale, stările emoționale etc.

Fluxul sanguin coronarian poate fi adaptat în condiții normale în funcție de necesități, în special prin mecanisme de autoreglare.

Glucosa este preluată de cardiomiocite din lichidul interstițial prin mecanisme de transport activ insulino-dependente, dar și în funcție de fluxul sanguin coronarian, știut fiind că glucosa se află în plasmă (glicemia) în concentrație constantă.

Metabolismul glucidic cardiac. Principalele aspecte metabolice glucidice cardiace interesează deosebi glicogenul, glucosa, acidul piruvic și acidul lactic.

Glicogenul se sintetizează din glucoză în prezența glicogen sintetazei și este degradat de glicogen fosforilază, cele două procese desfășurându-se într-un echilibru dinamic. Rezervele cardiomiocitare de glicogen sunt reduse și strâns legate de nivelul catecolaminelor circulante.

În condiții de normoxie, glucosa este folosită în cantitate redusă pentru producerea de energie în cardiocit. Rata de utilizare a glucozei reclamă însă o accelerare a vitezei de captare a hexozei de către cardiomiocit, așa cum se întâmplă în cursul unei activități cardiace crescute, hipoxie, stimulare adreno-simpatică etc.

Ajunsa în celula miocardică, glucosa este mai întâi fosforilată în prezența hexokinazei. Esterul fosfat astfel generat poate urma mai multe căi:

- sinteza de glicogen;
- glicoliza;
- intrarea în ciclul pentozofosfatului, mai puțin semnificativă; procese care sunt dirijate și reglate prin mecanism de *feed-back* negativ de concentrația intracelulară a glucozo-6-fosfatului.

În condiții de normoxie, pentru nevoi energetice, glucosa este degradată până la CO_2 , apă și eliberarea de energie, care este înmagazinată în legături macroergice din molecula de ATP. Procesul este inițiat în sarcoplasmă, unde rezultă glicerol-1-fosfat și acid piruvic, și este continuat în prezența oxigeonului la nivelul mitocondriilor. Ca urmare a proceselor de glicoliză, se eliberează o cantitate redusă din energia potențială din molecula de glucoză. Energia astfel eliberată se înmagazinează în legăturile macroergice a două molecule de ATP. Este însă singura sursă de energie anaerobă pe care o poate realiza miocardul. Una dintre enzimele cu importanță crescută în glicoliză este fosfofructokinaza. Aceasta se găsește în cantitate redusă în cardiomiocit și în bună parte în stare inactivă. Procesul de activare a fosfofructokinazei este reglat alosteric de către cantitatea de ATP din cardiomiocit. Astfel, scăderea cantității de ATP din cardiomiocit stimulează activarea fosfofructokinazei, care, prin creșterea vitezei de captare a glucozei de către celulă și activarea glicolizei, va accelera producerea de ATP. Dimpotrivă, un nivel optim sau crescut de ATP în cardiomiocit inhibă procesul de activare a fosfofructokinazei.

O altă enzimă implicată în metabolismul glucidic, care are și o dinamică deosebită, este lactic dehidrogenaza. În condiții de normoxie, lactic dehidrogenaza cardiomiocitară transformă acidul lactic (sursă sanguină) în acid piruvic. Acesta va fi ulterior introdus în ciclul Krebs pentru a fi trecut prin lanțul de fosforilări oxidative până la CO_2 , apă și eliberarea unei mari cantități de energie (36 de molecule de ATP). În condiții de hipoxie, lactic dehidrogenaza din cardiomiocit are o dinamică inversă, în sensul că ea transformă acidul piruvic în acid lactic așa cum, de altfel, în mod normal se întâmplă în miocitul striat scheletic.

Metabolismul lipidic cardiomiocitar. Este cunoscut faptul că în condiții de normoxie cardiomiocitul își asigură între 60 și 70% din energia necesară activității sale prin folosirea acizilor grași neesterificați. În acest scop, celula miocardică își creează un depozit de acizi grași liberi. Sursa cea mai importantă de acizi grași pentru cardiomiocit este însă reprezentată de sângele care irrigă inima și în care aceștia se găsesc în stare liberă sau sub formă de trigliceride. Preluarea acizilor grași din plasmă se face prin difuziune, deci aportul este în funcție de concentrația lor în torrentul sanguin. Trigliceridele plasmatiche reprezintă o altă sursă de acizi grași, întrucât ele pot fi transformate progresiv în acizi grași de către lipoprotein lipazele plasmatiche. Ajunși în citoplasmă, acizii grași sunt probabil legați de o proteină, pentru a se crea condiții de solubilizare, și apoi legați de CoA, pentru a fi transferați la nivelul mitocondriilor și introduși în procesul de beta-oxidare. Procesul de beta-oxidare fragmentează acidul gras, detașând progresiv câte un compus cu doi atomi de carbon, care va fi oxidat până la CO_2 , apă și energie. Cantitatea de energie eliberată prin degradarea unei molecule de acid gras este mult mai mare decât prin oxidarea unei molecule de glucoză și variază de la un acid gras la altul.

În condiții de hipoxie, acizii grași liberi sunt utilizați de celule miocardice și pentru sinteza de trigliceride, întrucât ei suferă un proces de esterificare cu glicerolul rezultat din glicoliza anaerobă.

Metabolismul proteic cardiac. Acizii aminați sunt utilizați pentru furnizarea de energie numai în anumite circumstanțe. În condiții de normoxie și aport satisfăcător de nutrienți aceștia nu au destinație energetică, fiind folosiți pentru *turnover*-ul proteinelor cardiomiocitare.

Sinteza de proteine este dependentă de nivelul plasmatic al acizilor aminați și are loc după aceeași schemă prin care procesul se derulează și în celelalte celule, necesitând consum energetic.

Mecanismele prin care sinteza de proteine din cardiomiocit este adaptată în diferite circumstanțe sunt mai puțin elucidate. Se cunoaște totuși că procesele de sinteză sunt stimulate de poliamine (spermina, putrescina), a căror sinteză este dependentă de activitatea ornitin decarboxilazei. Această enzimă prezintă în cardiomiocit se rennoiește rapid, în funcție mai ales de nivelul ATP din celulă. Scăderea nivelului ATP în cursul efortului fizic activează, printre altele, și activitatea ornitin decarboxilazei, care, pe calea poliaminelor, va stimula sinteza de proteine antreținând procesul de hipertrofie cardiacă.

Intensitatea proceselor de sinteză proteică poate fi apreciată urmărind nivelul ARN ribozomal și captarea acizilor aminați de către miocard. Celulele miocardice nu se înmulțesc, întrucât nu au fost descrise mitoze la acest nivel. Nu este exclusă însă diviziunea amitotică, de aceea, dacă se induce o supraîncărcare cardiacă, evenimentul cel mai precoce care se observă este creșterea ARN ribozomal și captarea acizilor aminați, după care se produce creșterea masei de țesut miocardic.

Cardiomiocitul având activitate ritmică, cele mai solicitate proteine sunt enzimele și, în consecință, *turnover*-ul lor este cel mai rapid. Sinteza miozinei miocardice se realizează mai lent față de proteinele sarcoplasmatiche, dar mult mai repede decât miozina din miocitul striat scheletic. Sinteza are loc la nivelul mitocondriilor într-un mod particular, organimul respectiv având ADN propriu.

Intensitatea proceselor metabolice proteice cardiace este rezultatul echilibrului dinamic între rata sintezei și degradării proteinelor cardiomiocitare.

6.1.1.1. Particularități ale metabolismului ATP și ale ionului de calciu la nivelul cardiomiocitelor

Relația dintre PO_2 din sângele coronarian și producerea de ATP. Inima, fiind un organ care se contractă ritmic toată viața, consumă o mare cantitate de energie pe seama legăturilor macroergice din molecula de ATP. Proteinele implicate în contracția și relaxarea musculară (proteinele contractile) consumă

aproximativ 90% din energia miocardică și doar 10% din energie este folosită pentru fenomenele de transport activ. Eliberarea energiei potențiale înmagazinate în legăturile macroergice de ATP se realizează de către ATPaze prezente nu numai la nivelul sarcolemiei, ci și în membranele reticulului sarcoplasmatic și mitocondriilor și, mai ales, la nivelul sarcomerului.

Cardiomiocitul, celula predominant aerobă, care utilizează, respectiv, sintetizează compuși macroergici în cantitate mare, consumă în consecință o mare cantitate de oxigen și, de aceea, sângele venos coronarian este practic lipsit de oxigen. Oxigenul din sângele coronarian trece în lichidul interstițial al miocardului datorită gradientului de presiune parțială și apoi în celulă, unde mai întâi este fixat de mioglobina, care îl transportă la mitocondrii, unde va fi folosit în reacțiile de fosforilare oxidativă generatoare de ATP. Orice creștere a necesităților energetice este satisfăcută și prin creșterea consumului de oxigen, proces care se poate realiza printr-o creștere proporțională a fluxului sanguin coronarian. Această ajustare a debitului coronarian la necesitățile în oxigen ale miocardului se realizează prin mecanisme de *feed-back* negativ, ca urmare a variațiilor concentrației de adenozină miocardică. În cursul efortului cardiac, prin degradarea ATP rezultă compuși intermediari, în cele din urmă adenozina, care este un principiu biologic vasodilatator. Cantitatea de adenozină astfel generată va induce un proces de vasodilatație proporțională cu cantitatea de bază purinică formată și, în consecință, o creștere proporțională a fluxului sanguin și a debitului de oxigen coronarian.

Metabolismul ionului de calciu. În condiții de repaus, ionul de calciu se găsește în sarcoplasmă în cantitate de 10^{-7} M. Timpul motor (contractia) este declanșat când nivelul ionului de calciu atinge valoarea de 10^{-5} M.

Reticulul sarcoplasmatic este mai puțin reprezentat în cardiomiocit în comparație cu miocitul striat scheletic și de aceea ATP-aza calciu-dependență este mai bine exprimată la nivelul sarcolemiei, decât al membranelor reticulare. Potențialul de acțiune cardiomiocitar fiind rezultatul modificărilor de permeabilitate membranară, în special pentru ionii de sodiu și calciu, creșterea nivelului citosolic al calciului se realizează în mod deosebit pe seama calciului extracelular. Mișcările calciului din cardiomiocit sunt diferite față de celula musculară striată scheletică. Astfel, calciul venit din exterior în timpul excitației cardiomiocitului (platoul potențialului de acțiune) ajunge în cea mai mare parte direct la nivelul proteinelor din constituția sarcomerului și doar în foarte mică măsură se fixează în reticulul sarcoplasmatic, spre deosebire de miocitul striat scheletic, în care cea mai mare parte a calciului provine din reticulul sarcoplasmatic. Această dinamică a ionului de calciu explică perturbările, uneori foarte grave (până la oprirea inimii), ale activității cardiace într-un mediu sărac, respectiv lipsit de calciu.

6.1.1.2. Modalitățile de răspuns ale miocardului în diferite circumstanțe fiziologice și patologice

Diferențierile morfologice și funcționale ale cardiomiocitelor conferă miocardului particularități în răspunsul față de anumiți stimuli, în sensul că:

- în condiții de supraîncărcare mecanică miocardul reacționează prin *hipertrofie*;
- în prezența oxigenului miocardul se necrozează.

Răspunsul miocardului în condiții de efort prelungit. În condițiile în care lucrul mecanic al inimii crește după o perioadă de latență foarte scurtă se produc simultan:

- creșterea consumului de energie și
- stimularea sintezei de proteine.

Creșterea consumului de energie este lesne de înțeles în condițiile de supraîncărcare mecanică a inimii și poate fi evaluat prin măsurarea consumului de oxigen. Consumul de oxigen crește proporțional și simultan cu creșterea lucrului mecanic cardiac. Acest proces este posibil datorită capacității patului arterial coronarian de a-și mări volumul prin vasodilatație, realizând astfel o creștere proporțională a debitului coronarian. Acest comportament reprezintă singura posibilitate care stă la dispoziția inimii în vederea ajustării consumului de oxigen la necesități. Paralel cu ajustarea consumului de oxigen se realizează astfel, în mod implicit, și creșterea aportului și consumului de substrat și în special de acizi grași neesterificați.

Întrucât cardiomiocitele nu se pot înmulți, inima nu poate să-și intensifice activitatea prin această modalitate la nesfârșit, astfel încât celulele miocardice s-au adaptat metabolic prin intensificarea sintezei de

proteine, în special contractile. Stimularea sintezei de proteine se instalează după o perioadă de latență foarte mică, din momentul în care inima are de făcut un efort mai mare. Precocitatea acestui proces este evidențiată de apariția și creșterea numărului polizomilor după mai puțin de 20 de minute de la realizarea unei stenoze aortice experimentale. Un alt proces care se instalează odată cu creșterea travaliului cardiac este creșterea ratei de incorporare a acizilor aminați în miofibrile, ceea ce duce la hipertrofie cardiacă. Această stimulare a incorporării acizilor aminați în cardiomiocite durează atât timp cât inima desfășoară o activitate crescută și revine la nivelul anterior creșterii travaliului cardiac odată cu încetarea travaliului cardiac crescut. Dacă supraîncărcarea cardiacă se prelungește, se poate ajunge la insuficiență cardiacă, probabil datorită stotezei unor proteine anormale.

Hipertrofia cardiacă este deci rezultatul sintezei unei cantități crescute de proteine contractile și reprezintă un fenomen de adaptare a metabolismului cardiac la persoane care efectuează un efort fizic mai intens și pentru o lungă durată. Hipertrofia cardiacă poate să apară la om și în diverse condiții patologice (stenoza aortică, hipertensiune arterială etc.) ca o încercare a inimii de a face față nevoilor hemodinamice ale organismului afectat. Evoluția hipertrofiei cardiace apărute în circumstanțe patologice poate să evolueze către insuficiență cardiacă, așa cum se întâmplă și în condiții experimentale.

Metabolismul cardiac în hipoxie. Miocardul, fiind un mare consumator de energie, nu poate să-și desfășoare activitatea în absența oxigenului, de aceea și-a diferențiat o serie de mecanisme compensatoare care preiau ponderea producerii de energie, dar care pot fi prin ele nefaste pentru organul respectiv.

În cea mai mare parte a situațiilor, mecanismele declanșate pentru asigurarea energiei necesare activității inimii sunt satisfăcătoare și hipoxia este reversibilă. În aceste circumstanțe, ar fi necesar să se contureze noțiunea de hipoxie miocardică în vederea interpretării proceselor metabolice consecutive, știut fiind că și în condiții de repaus sângele venos coronarian este deosebit de sărac (practic lipsit) în oxigen. Deci, în orice situație în care organismul iese din starea de repaus și inima trebuie să realizeze un travaliu suplimentar (adekvat necesităților de moment) cardiomiocitul nu i se oferă cantitatea de oxigen necesară (suficientă) și intră în stare de hipoxie. Hipoxemia miocardului realizată la începutul unei astfel de situații este, în condiții normale, înlăturată ulterior prin declanșarea unor mecanisme compensatoare ce ajustează debitul sanguin și implicit al oxigenului coronarian.

Pe plan metabolic primul indice al stării de hipoxie cardiomiocitară este scăderea cantității de creatin fosfat din compoziția sa.

Dacă hipoxia persistă o perioadă mai îndelungată, metabolismul cardiac suferă uneori modificări profunde caracterizate prin:

- scăderea proporțională cu gradul hipoxiei a producerii pe cale aerobă de ATP;
- creșterea conținutului de fosfat anorganic, ADP și adenozină;
- acumularea de sarcioi acide la nivelul cardiomiocitului și mai ales scăderea pH-ului intracardiocitar.

Sinteza de ATP în cardiomiocit, realizându-se aproape în exclusivitate în condiții de aerobioză, scăderea sintezei acestuia dintr-o astfel de sursă în hipoxie ar trebui să fie urmată de întreruperea funcționării proteinelor contractile. Cardiomiocitul și-a diferențiat însă mai multe posibilități de aprovizionare cu ATP, așa încât, în absența oxigenului, se va stimula producția de ATP prin glicoliză anaerobă. Astfel, în momentul apariției oricărui grad de hipoxie, crește cantitatea de ADP și fosfor anorganic la nivelul cardiomiocitului, ceea ce duce la activarea fosfofructokinazei, enzimă fosforilantă a glucozei, și, în consecință, se stimulează glicoliza. Ca urmare a stimulării proceselor de glicoliză anaerobă, crește captarea glucozei în miocard, iar în cardiomiocit se acumulează produșii săi de catabolism: 1-glicerol fosfat și acidul piruvic. Glicerol fosfatul va servi la sinteza de trigliceride prin esterificarea acizilor grași liberi din cardiomiocit, întrucât, în lipsa oxigenului, aceștia nu mai pot fi degradați până la produșii finali. Prezența vacuolelor lipidice, puse în evidență la microscopul electronic, în cardiomiocit reprezintă un semn de ischemie cardiacă (fig. 6.5).

Acidul piruvic rezultat din procesele de glicoliză poate fi introdus în procesele de fosforilare oxidativă mitocondrială în lipsa oxigenului și este transformat în acid lactic sub acțiunea lactic dehidrogenazei, care și-a modificat dinamica de acțiune în absența oxigenului. Nevoia de glucoză a cardiomiocitului hipoxemat se asigură și prin procese de glicogenoliză, care reduc până la dispariție rezervele de glicogen ale celulei.

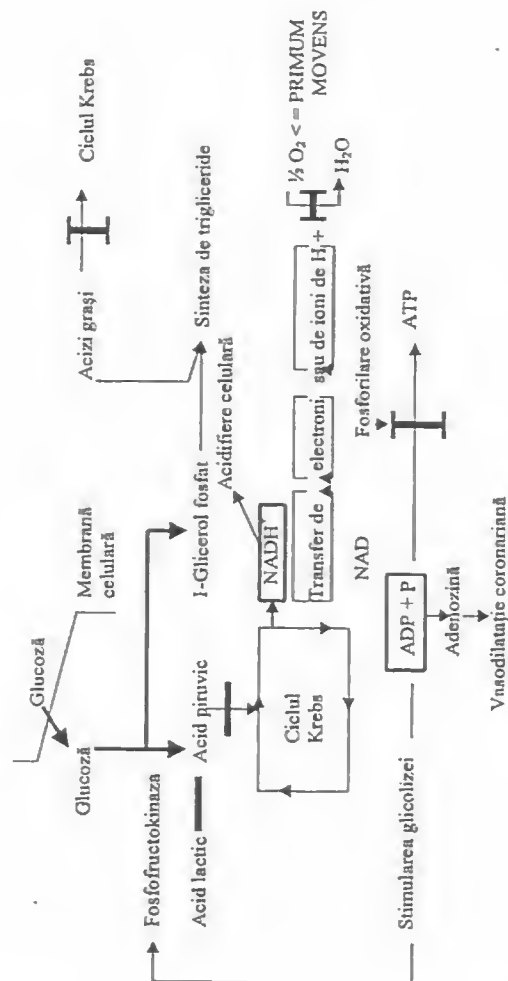


Fig. 6.5. Reprezentare schematică a metabolismului cardiac în hipoxie (după Meyer). Linia îngroșată semnifică accelerarea procesului metabolic. Linia barată semnifică oprirea procesului metabolic. Substratul înădrat semnifică acumularea sa.

În tendința cardiomiocitului de a-și asigura necesarul de energie, ATP este degradat până la produși finali, inclusiv adenoza, substanță cu acțiune relaxantă asupra musculaturii netede din peretele vascular. Vasodilatația compensatoare a arteriolelor coronariene indusă de adenozină în aceste circumstanțe va crește fluxul sanguin coronarian în tendința miocardului de a se aproviziona cu o cantitate cât mai mare (pe cât posibil satisfăcătoare) de oxigen.

Blocarea ciclului Krebs în hipoxie prin oprirea reacțiilor de oxido-reducere determină acumularea de ioni de hidrogen (acidifierea) în mediul intracardiomicitar și, ca o consecință, creșterea permeabilității membranare. Prin această permeabilizare a sarcolemei, ionii de hidrogen, potasiu și fosfați, enzime, cum ar fi lactic dehidrogenaza, vor părăsi celulele miocardice și vor ajunge în sângele venos coronarian, reprezentând un indicator al gradului de hipoxie.

Scăderea pH-ului cardiomicitar prin modificările de permeabilitate membranară induce și scăderea potențialului membranar, cu repercusiuni asupra excitabilității. Cardiomiocitul răspunde mai greu la stimuli, iar intensitatea răspunsului este redusă. Modificările funcționale sunt urmate de modificări morfologice și, ca urmare a blocării sintezei de proteine contractile, enzime etc., hipoxia duce în cele din urmă la moarte celulară (necroza miocardică).

6.1.2. CORDUL – ORGAN ENDOCRIN

În afara fibrelor miocardice contractile și a sistemului excito-conductor, cercetările cu microscopul electronic au pus în evidență un al treilea tip de celule cardiace la nivelul auriculelor, cu conținut bogat în granule secretoare. Faptul, fiind semnalat de Jamieson și Palade (1964) și confirmat ulterior de numeroși cercetători, a determinat cercetări sistematice asupra naturii produșilor de secreție ai acestor granule. În timp ce unii autori au adus dovezi histofluorescente în favoarea conținutului bogat în catecolamine al granulelor respective, alții au demonstrat natura lor polipeptidică.

Studiind efectele biologice ale extractelor atriale, De Bold și colab. (1981) au constatat o puternică diureză la șobolan. Alți autori (Deth și colab., 1982) au arătat că proprietățile diuretice sunt dublate de o evidentă acțiune natriuretice și vasodilatatoare. Factorul biologic activ de natură peptidică producătoare de efecte diuretice, natriuretice și vasodilatatoare din extractele atriale a fost denumit peptid natriuretic atrial, atriopeptin, cardiodilatin sau cardionatrin. Comitetul internațional de nomenclatură a propus denumirea comună de factor natriuretic atrial (ANF). În prezent se admite că există mai mulți factori secretați de cardiomiocitele atriale ale mamiferelor inclusiv umane. Conținutul în ANF al ventriculelor este mult mai mic decât cel al auriculelor (fig. 6.6.).

Eliberarea ANF din granulele secretoare atriale este stimulată de creșterea presiunii intraatriale.

Sensibilitatea deosebită a granulelor secretoare la distensie a fost dovedită experimental cu ajutorul unui balonaș introdus în auriculă dreaptă. Creșterea doar cu 1 mmHg a presiunii intraatriale realizează o suplimentare a eliberării cu 30–40%. Prin acest mecanism, toate situațiile normale sau patologice care determină creșterea volumului extracelular, întoarcerii venoase și a presiunii intraatriale se însoțesc de intensificarea progresivă (de până la 20 de ori) a eliberării de ANF din granulele secretoare miocardice.

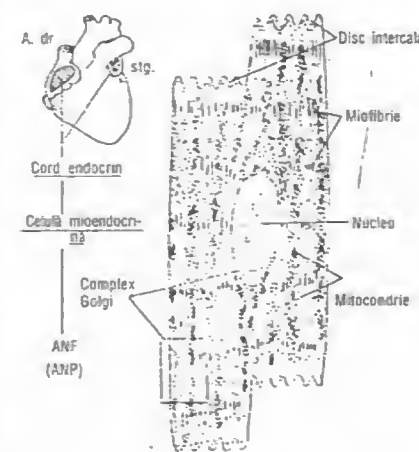


Fig. 6.6. Cardiomiocitele atriale eliberatoare de factor natriuretic atrial (ANF).

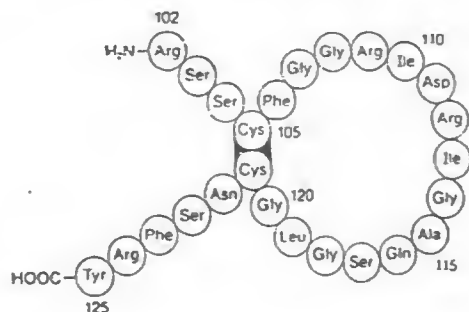


Fig. 6.7. Structura chimică a ANF.

La rândul lor, studiile privind extracția și purificarea ANF au stabilit că acesta se găsește la nivel granular sub formă de prohormon, format din 126 de aminoacizi. În timpul sau imediat după eliberare, prohormonul este clivat în ANF activ, constituit din 28 de aminoacizi (fig. 6.7). Eliberarea sa este activată și de către sistemul nervos simpatic, prin mecanism alfa-adrenergic.

Recent s-a evidențiat imunohistochimic prezența nui ANF specific sistemului nervos central, mai ales la nivel hipotalamic.

Structura chimică și efectele fizio-farmacologice ale celor doi factori natriuretici permit presupunerea existenței nui veritabil ax cord-creier, asemănător celui descris anterior în cazul tubului digestiv sau al rinichiului, cu rol important în autoreglarea neuro-endocrină a funcțiilor respective.

Astfel, în afara funcției de motopompă aspiro-respingătoare, inima îndeplinește un important rol endocrin secretor de peptide hormonale (substanță P, neurotensină, VIP, ANP, SRA etc.). Unul dintre acestea este factorul natriuretic atrial (ANF sau ANP = *atrial natriuretic peptide*), denumit și atriopentin, amplu studiat în ultimele două decenii. Descoperit de către Bold și colab. (1985) în cordul mamiferelor, inclusiv umane, ANF este un peptid hormonal circulant format din 28 de aminoacizi secretat de granulele cardiomiocitelor atriale.

Excitantul fiziologic al eliberării sale este reprezentat de stimularea receptorilor de întindere, determinată de distensia atriilor produsă de creșterea întoarcerii venoase și umplerii diastolice din timpul revoluției cardiace normale și, mai ales, patologice. Concentrații mari de ANF conțin sub formă de probormon (126 de aminoacizi) cardiomiocitele urechiușelor atriale. Ca hormon circulant, ANF acționează asupra vaselor, inclusiv coronare, rinichilor, glandelor suprarenale, creierului, complexului hipotalamo-hipofizar, tubului digestiv și altor teritorii efectoare, în vederea producerii de reacții cardio-vasculare și hidro-electrolitice compensatoare, indispensabile contracarării modificărilor induse de factorii de distensie exagerată a atriilor.

În afara proprietăților vasodilatatoare predominant renale, ANF provoacă inhibiția secreției de renină de la nivelul celulelor granulare ale arterei aferente renale, precum și a hipersecreției de aldosteron corticosuprarenal produsă de angiotensină. O importantă acțiune inhibitorie este realizată, de asemenea, asupra secreției de ADH hipofizar și a efectelor anti-diuretice ale acestuia la nivelul canalelor colectoare renale, cu răsunetul funcțional corespunzător reprezentat de creșterea excreției de apă și sodiu. Alte date referitoare la mecanismul de producere a acestor acțiuni și implicațiile lor fiziopatologice sunt prezentate la subcapitolul Hormoni locali peptidici.

Alte peptide vasoactive (VIP, substanță P, neurotensina, SRA) au fost identificate în inima mamiferelor, cu rol fiziologic încă neprecizat.

6.2. PROPRIETĂȚILE MUȘCHIULUI CARDIAC

6.2.1. EXCITABILITATEA (FUNCȚIA BATMOTROPĂ)

Excitabilitatea este capacitatea mușchiului cardiac în repaus de a răspunde la o excitație printr-o depolarizare (potențial de acțiune), urmată de contracție.

a) *Potențialul de repaus al fibrei miocardice.* Determinările efectuate cu ajutorul microelectrozilor intracelulari au stabilit faptul că valorile potențialului de repaus transmembranar variază în celula miocardică în jurul cifrei de -90 mV.

Sarcolema miocardică se caracterizează printr-o permeabilitate de repaus selectivă, fiind practic impermeabilă pentru Na^+ și de cca 100 de ori mai permeabilă pentru K^+ .

b) *Potențialul de acțiune al fibrei miocardului ventricular.* Sub acțiunea stimulilor intrinseci (potențialul de acțiune propagat din sistemul excito-conductor automat) sau extrinseci (mecanici, fizici, chimici), membrana fibrei miocardice iese din starea de repaus. Deschiderea canalelor ionice voltaj-dependente din structura membranei determină fluxuri ionice tranzitorii, a căror succesiune dinamică duce la apariția și evoluția potențialului de acțiune.

Caracteristicile sarcolemei miocardice, tipurile de canale ionice, densitatea și proprietățile lor dinamice (prag, constantă de inactivare, capacitate de transport) determină diferențe semnificative între evoluția potențialului de acțiune înregistrat în fibra musculară cardiacă și potențialele de acțiune înregistrate în alte structuri excitabile (fibra nervoasă, fibra musculară scheletică). Studiul funcționării canalelor membranare s-a realizat cu ajutorul metodei de „patch clamp voltage”.

În cazul fibrelor miocardice ventriculare, durata potențialului de acțiune este cel puțin dublă (cca 300 ms), iar repolarizarea se produce după apariția unui platou, cu durata de cca 200-250 ms, în timpul căruia fibra se menține depolarizată (fig. 6.8). Potențialele mai mici și mai lente există la celulele sistemului excito-conductor. Varietatea formei potențialelor de acțiune la diferite tipuri de celule miocardice depinde de mișcările ionice prin canalele membranare.

În sarcolema miocardică s-au descris mai multe tipuri de canale ionice, implicate în evoluția caracteristică a potențialului de acțiune.

Canalele sunt formațiuni care permit sau facilitează mișcările ionice prin bariera hidrofobă. Ele sunt constituite din spațiile realizate de configurația moleculară a unor proteine și conțin apă, în care ionii se mișcă în funcție de gradientul electro-chimic. Canalele pot fi închise sau deschise în funcție de conformația lor moleculară, care poate realiza adevărate „porți”. Acestea pot fi de „activare” (A, m sau d) sau de „inactivare” (I, h sau f). Depolarizarea deschide porțile A și închide porțile I, iar repolarizarea închide porțile A și redeschide porțile I.

Există 2 tipuri de canale principale pentru curenții spre interior cu acțiune depolarizantă:

- unul rapid pentru Na^+ (I_{Na}),
- unul lent pentru Ca^{2+} (I_{Ca} sau I_{Si} slow inward).

I_{Na} este responsabil pentru faza 0 a potențialului de acțiune și poate fi blocat de tetrodotoxină.

I_{Ca} joacă un rol important în determinarea duratei potențialului de acțiune și a fazei refractare la toate

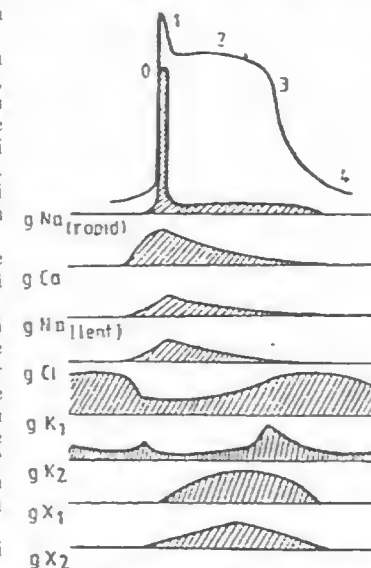


Fig. 6.8. Potențialul de acțiune în celula miocardică, contractilă și fluxurile ionice determinate. 0, deschiderea canalelor de Na^+ ; 1, închiderea canalelor de Na^+ ; 2, deschiderea canalelor de Ca^{2+} ; închiderea canalelor rapide de K^+ ; 3, închiderea canalelor de Ca^{2+} ; deschiderea canalelor lente de K^+ ; 4, potențial de repaus.

celulele miocardice, în generarea potențialelor de acțiune și activitatea automată a țesutului nodal, ca și în inițierea și dezvoltarea contracției miocardice.

Pentru curenții spre exterior responsabili de repolarizare, rolul cel mai important îl are K^+ , pentru care există mai multe canale prin care se realizează curenți numiți și „rectificatori”.

I_{K1} este curentul rectificator „anormal” și are rol în menținerea potențialului de repaus la toate celulele miocardice, cu excepția celor din nodulul sino-atrial.

I_{K1} sau $I_{K1,0}$ este un curent tranzitor ce contribuie la repolarizarea inițială.

I_{K1} sau rectificator „întârziat” se deschide la sfârșitul platoului, fiind principalul responsabil pentru repolarizare.

$I_{K(Ca)}$ este activat de creșterea Ca^{2+} citoplasmatic.

$I_{K(ATP)}$ este activat de ATP, fiind activat în cursul hipoxiei și al deprăvirilor energetice.

$I_{K(ACh)}$ este activat de acetilcolină, fiind stimulat de creșterea activității vagale.

Există și canale pentru Cl^- , care pot fi influențate de nivelul cAMP, Ca^{2+} sau ATP, prin intervenția unor receptori (adrenergici, muscarinici, adenzinici).

În condiții fiziologice, canalele de Cl^- generează în repaus un curent depolarizant spre interior, iar în cursul potențialului de acțiune generează un curent repolarizant spre exterior.

Activitatea canalelor ionice și, deci, aspectul potențialelor de acțiune sunt influențate de Mg^{2+} , a cărui creștere poate bloca parțial canalele de Na^+ , Ca^{2+} sau K^+ .

Analizând dinamica potențialului de acțiune în fibra miocardică ventriculară, se disting următoarele faze succesive.

Faza 0. Depolarizarea rapidă (*spike-potențial*) se datorează influxului rapid și masiv de Na^+ prin canalele voltaj-dependente activate în momentul în care, sub acțiunea stimulului, membrana se depolarizează la valoarea de prag (-55 mV, -60 mV). Membrana se depolarizează rapid, potențialul trece în zona valorilor pozitive *overshoot* (+15 mV, +30 mV), stabilindu-se pentru 6-15 ms în zona potențialului de echilibru al Na^+ . În cazul celulelor *pace-maker*, curentul depolarizant fiind realizat de Ca^{2+} , faza 0 este mult mai lentă.

Faza 1. Imediat după *overshoot* urmează repolarizarea rapidă, în care potențialul de membrană revine rapid spre valoarea 0. Această repolarizare se datorează: influxului rapid de Cl^- prin deschiderea canalelor voltaj-dependente respective; inactivării canalelor de Na^+ rapide, care își încheie acțiunea, întrerupând influxul rapid de Na^+ și, în fine, unui eflux ușor mărit de K^+ prin canalele I_{K1} deschise, tot voltaj-dependente.

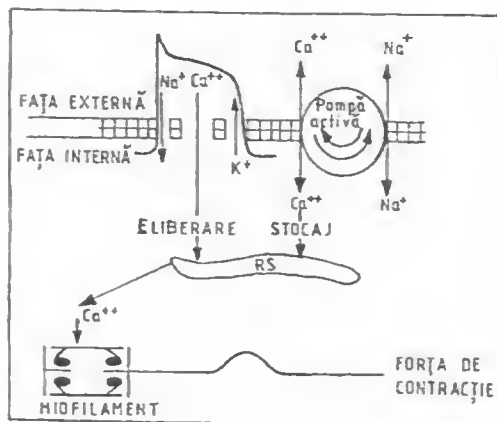


Fig. 6.9. Manifestări electro-chimice cardiace. RS, reticul sarcoplasmatic.

Faza 2. În această fază, depolarizarea se prelungește la un nivel aproape constant, generând platoul caracteristic, cu o durată de cca 100 ms. Depolarizarea se menține mai ales datorită activării canalelor lene de Ca^{2+} și a curentului rectificator axonal I_{K1} .

Faza 3. Repolarizarea moderat rapidă (cca 100-150 ms), care urmează platoului, readuce potențialul membranal la valorile de repaus. Ea se datorează fluxului spre exterior al K^+ , mai ales prin I_{K1} , dar și prin I_{K1} și I_{K1} .

Faza 4. În această fază, fibra miocardică își menține valorile potențialului de repaus, la care a ajuns în urma repolarizării finale. În această etapă, un rol esențial este jucat de transportul activ de Na^+-K^+ prin $Na^+,K^+-ATPaza$, transportul activ de Ca^{2+} prin $Mg^{2+}-ATPaza$ și de efluxul de K^+ (fig. 6.9).

c) Potențialul de acțiune al fibrei miocardului atrial. Potențialele transmembranare înregistrate cu microelectrozi în fibrele atriale *in situ*, sau izolate, diferă de cele înregistrate în fibrele miocardului ventricular (care au fost descrise mai sus). În fibrele atriale nu apare faza de platou, *spike-potențialul* fiind urmat imediat de o repolarizare lentă (fig. 6.10). Durata potențialului de acțiune este redusă la valori sub 200 ms, din cauza creșterii rapide a permeabilității pentru K^+ .

d) Modificările excitabilității în cursul potențialului de acțiune (legea inexcitabilității periodice). În cursul desfășurării potențialului de acțiune, fibrele miocardice sunt refractare la acțiunea oricărui alt stimul. Excitabilitatea revine la valoarea potențialului de repaus la sfârșitul repolarizării, trecând printr-o fază supranormală.

Se descriu mai multe faze în evoluția excitabilității fibrelor miocardice (fig. 6.11):

- *perioada refractară absolută* durează de la momentul declanșării potențialului de acțiune și până când repolarizarea atinge valori cu puțin peste prag (-50 mV, -60 mV). În această perioadă, celula nu poate fi excitată;
- *perioada răspunsului local gradat* urmează imediat perioadei refractare absolute, împreună cu aceasta formând perioada refractară efectivă. Excitanții aplicați în această perioadă pot determina răspunsuri locale gradate, dar nu declanșează potențialele de acțiune propagate, indiferent de intensitatea lor;
- *perioada refractară relativă* începe imediat după ce repolarizarea a depășit valoarea pragului de repaus. În această perioadă, fibra răspunde la stimuli cu intensitate redusă (sub prag) prin potențiale de acțiune cu ascensiune și amplitudine submaximale;
- *perioada de revenire completă* include fazele enumerate, până în momentul în care potențialul de repaus este stabil, iar potențialele de acțiune evoluează normal;
- *perioada de revenire parțială* este un termen utilizat uneori pentru a desemna, în cazul inimii în întregime, intervalul în cursul căruia unele fibre sunt complet excitabile, în timp ce altele rămân încă refractare.

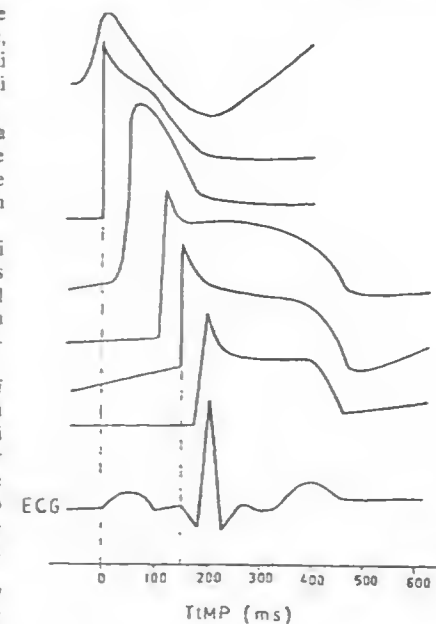


Fig. 6.10. Reprezentare cronologică a diferitelor potențiale de acțiune cardiace. Corespondența cu ECG. De sus în jos, înregistrări intracelulare din: nodulul S-A, fibrele miocardului atrial, nodulul A-V, fasciculul His, fibrele Purkinje, fibrele miocardului ventricular.

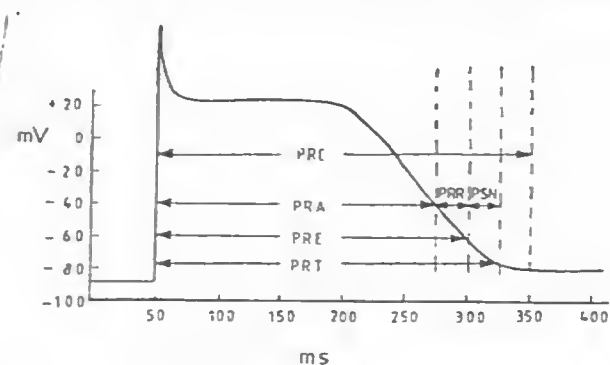


Fig. 6.11. Modificările excitabilității fibrei miocardice în cursul potențialului de acțiune. Sunt marcate: perioada refractară absolută (PRA), relativă (PRE), efectivă (PRE), totală (PRT), perioada de revenire completă (PRC), perioada supranormală (PSN).

Existența perioadei refractare (descrișă și sub denumirea de „legea inexcitabilității periodice a inimii”) are o importanță deosebită pentru activitatea sincizii funcțional miocardice. Ea explică imposibilitatea tetanizării mușchiului cardiac și favorizează activitatea ritmică a inimii.

e) *Extrasistola*. Datorită inexcitabilității periodice mușchiul cardiac nu răspunde la numeroși stimuli de origine extranodală (cardiaci sau extracardiaci de natură reflexă). Dacă acești stimuli survin însă în cursul perioadei de excitabilitate normală (diastolică), înaintea stimulului normal de origine nodală, ei pot determina o depolarizare precoce a mușchiului cardiac și o sistolă în afara ritmului normal. Această extrasistolă, prin propria sa perioadă refractară, împiedică răspunsul cardiac la stimulul normal imediat următor. Urmează, datorită acestui fapt, un așa-zis repaus „compensator”, după care se produce sistola cardiacă ca răspuns la al doilea stimul normal. Rareori, când extrasistola se plasează exact la jumătatea distanței dintre două depolarizări, repausul compensator nu mai apare (extrasistolă „adevărată”). Extrasistola poate apărea și în inima normală (reflexe abdominale, stimulare cerebrală, exces de alcool, cafea, fumat, anxietate, oboseală excesivă, diferite droguri).

f) *„Legea tot sau nimic”*. Dacă excitanții subliminari determină doar răspunsuri gradate locale, care nu se propagă și nu pot iniția o sistolă, excitanții liminari și supraliminari determină un răspuns maximal (potențialul de acțiune propagat și sistola), ale cărui amplitudine și durată nu depind de intensitatea excitantului.

g) *Fenomenul „în scară” (Bowditch)*. Urmărindu-se amplitudinea sistolei cardiace în funcție de frecvența de stimulare, s-a observat că, pentru aceeași intensitate de stimulare, amplitudinea sistolei crește gradat, odată cu mărirea frecvenței excitantului, până la un plafon maxim care nu poate fi depășit. Fenomenul s-ar explica prin scăderea treptată a K^+ intracelular sau/și acumularea Ca^{2+} , care ar permite formarea unui număr crescut de punți acto-miozine.

6.2.2. AUTOMATISMUL

Inima își continuă activitatea ritmică contractilă chiar dacă este izolată de orice influențe nervoase și umorale, prin scoaterea sa din organism. Capacitatea celulelor cardiace de a genera spontan impulsuri se numește *automatism*. În condiții normale, această proprietate apare la celulele specializate aparținând sistemului nodal, în care se inițiază ritmul cardiac. Descărcând automat impulsuri ce se propagă în miocard determinând contracția, aceste celule constituie adevărați „pace-maker-i” cardiaci, ce se comportă ca un

veritabil sistem de aprindere. În condiții fiziologice, *pace-maker-ul* cardiac dominant este reprezentat de celulele nodului sino-atrial și alte celule atriale (câi internodale, zona prejoncțională a nodului atrio-ventricular). Având frecvența de descărcare maximă, ele impun ritmul propriu restului inimii (ritm sinusal). Restul celulelor sistemului nodal (nodul atrio-ventricular, fasciculul His, rețeaua Purkinje) reprezintă *pace-maker-i* latenți, intrând în acțiune doar în absența influențelor sinusale. În anumite condiții anormale, și alte celule miocardice, care nu sunt *pace-maker-i*, pot manifesta automatism. Întârzierea repolarizării la un grup de celule poate determina, cu alte celule deja repolarizate, un flux de curenți excitatori suficient pentru reexcitarea celulelor adiacente. Unele droguri (de exemplu, aconitina) determină postpotențiale oscilante. Aceste depolarizări pot iniția nmi potențiale de acțiune. Oscilații spontane ale potențialelor cardiace pot apărea în timpul sau după repolarizare, dând naștere la răspunsuri premature ce caracterizează o depolarizare „declanșată”, care poate fi inițiată de o postdepolarizare precoce sau tardivă.

Postdepolarizarea precoce se datorește unor anomalii ale curenților ionici responsabili de faza a 3-a a potențialului de acțiune sau reactivării curentului de Na^+ și a schimburilor Na^+-Ca^{2+} .

Postdepolarizarea tardivă apare după ce repolarizarea s-a terminat, mai ales în cazul supraîncărcărilor cu Ca^{2+} .

Mecanismul general al automatismului cardiac. Faptul că celulele sistemului nodal descarcă automat impulsul de contracție se explică prin incapacitatea acestor celule de a menține un potențial membranar de repaus constant. În cursul diastolei, celulele se depolarizează lent și continuu. Când, datorită acestei depolarizări diastolice, se atinge pragul de excitație, începe deschiderea canalelor ionice voltaj-dependente și se produce potențialul de acțiune, ce se propagă, determinând sistola.

Caracteristicile și mecanismele ionice ale depolarizării diastolice și potențialului de acțiune automat. Depolarizarea diastolică și potențialul de acțiune consecutiv au caracteristici ce diferă în funcție de segmentul sistemului nodal în care sunt generate. Aceste diferențe se datorează fluxurilor ionice specifice celulelor implicate (fig. 6.12).

a) *La nivelul nodului sino-atrial* potențialul de repaus (sau, mai exact, potențialul diastolic maxim) are în general valori reduse, de numai -60 mV, -70 mV. Atingerea acestei valori în cursul repolarizării este urmată, în faza a 4-a a potențialului, de o depolarizare diastolică lentă. Atingerea pragului (-55 mV, -60 mV) determină declanșarea unui potențial de acțiune cu o fază 0 lentă, lipsită de *overshoot*, cu o amplitudine de numai -55 mV, -65 mV. Repolarizarea rapidă și platoul (fazele 1 și 2) nu sunt distincte, depolarizarea inițială fiind urmată de o repolarizare lentă. Durata totală a potențialului de acțiune este redusă la numai 200 ms. Potențialul nu este influențat de TTX, dar este blocat de Mn^{2+} .

Celulele P, în care este generat acest potențial, se caracterizează printr-o permeabilitate crescută la Na^+ datorită unui curent I_p prin care Na^+ este introdus în celulă. Concomitent scade lent curentul rectificator

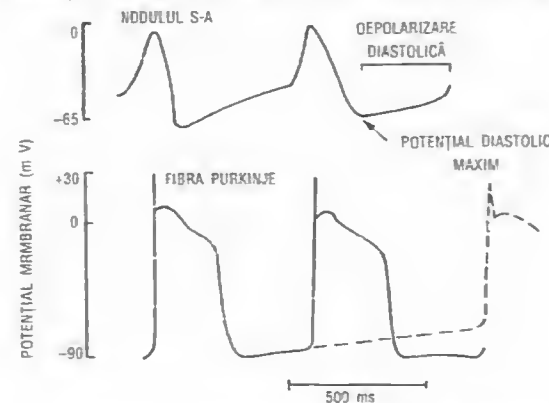


Fig. 6.12. Potențiale de acțiune în nodul S-A și fibra Purkinje.

„întârziat“ (I_{K1}) și intervenția curentului rectificator „anormal“ (I_{K1}). La reducerea curentului net spre exterior și a creșterii celui spre interior de care depinde depolarizarea lentă diastolică participă și curentul lent de Ca^{2+} , care își continuă activitatea și în diastolă.

Posibilitatea modulării prin cAMP a curentului I_f este importantă în reglarea activității celulelor *pace-maker* sub influența neurotransmițătorilor.

Atingerea pragului în celulele P nu determină o depolarizare rapidă (faza 0). Numărul redus, sau chiar absența canalelor de Na^+ rapide în membrana celulelor din nodulul sino-atrial, face ca depolarizarea (faza 0) să se producă mai ales prin activarea canalelor lente de Ca^{2+} , ceea ce determină atenuarea semnificativă a paotei ascendente și absența *overshoot*-ului.

b) La nivelul nodulului atrio-ventricular, potențialul de acțiune automat este de tip intermediar, între cel observat în nodulul sino-atrial și cel înregistrat în cursul descărcării fibrelor Purkinje. Potențialul de repaus (diastolic maxim) are valori reduse (-60 mV), durata depolarizării diastolice (faza 4) este prelungită, determinând o frecvență de descărcare redusă, faza de depolarizare (faza 0) este lentă, amplitudinea potențialului este redusă, repolarizarea rapidă (faza 1) nu se observă, iar platoul, deși se schițează, are o durată redusă și se poate termina cu o hiperpolarizare. Potențialul are o durată de cca 200-250 ms. Fluxurile ionice ce determină acest potențial sunt probabil similare cu cele descrise în celulele P, diferențele fiind mai ales de ordin cantitativ.

c) La nivelul celulelor Purkinje, potențialul de acțiune automat este oet diferit. Potențialul diastolic maxim atinge valori de -90 mV, iar depolarizarea diastolică este extrem de lentă ($0,02$ V/s). Prezența canalelor de Na^+ rapide face ca depolarizarea inițială (faza 0) să fie foarte rapidă, iar amplitudinea potențialului să atingă valori de -120 mV, ca în fibra musculară atrială. Existența canalelor de Cl^- voltaj-dependente determină apariția unei repolarizări rapide evidente (faza 1), platoul (faza 2) începând la valori de potențial mai reduse decât în cazul fibrelor ventriculare. Durata potențialului este egală cu cea din miocardul ventricular.

6.2.3. RITMICITATEA (FUNCTIA CRONOTROPĂ)

Frecvența contracției cardiace depinde de frecvența cu care se produce descărcarea potențialului de acțiune propagat din sistemul nodal. Această frecvență va depinde de panta depolarizării diastolice, adică de viteza cu care celula nodală ajunge de la sfârșitul repolarizării (faza 3) la valoarea de prag a excitației. Cu cât durata acestui interval este mai redusă, cu atât frecvența descărcării automate a potențialului de acțiune este mai mare. Din acest motiv, la nivelul sistemului nodal cardiac, frecvența maximă de descărcare o prezintă nodulul sino-atrial ($70-80$ /min), în timp ce nodulul atrio-ventricular și celulele Purkinje din fasciculul His și rețeaua Purkinje vor descărca cu frecvențe joase, de $40-60$ /min și, respectiv, $20-40$ /min, în funcție de duratele tot mai mari ale depolarizărilor diastolice corespunzătoare. În condiții normale, ritmul cardiac este impus de structura cu cea mai mare frecvență de descărcare, adică de nodulul sino-atrial (ritm sinus). Restul formațiunilor nu pot impune ritmul propriu miocardic, întrucât, primind potențialul de acțiune propagat din nodulul sino-atrial, se vor depolariza, declanșând potențiale de acțiune înainte de a ajunge la sfârșitul depolarizării diastolice. În aceste condiții fiziologice, nodulul atrio-ventricular are rolul de a întârzia propagarea impulsului de la atri la ventricule; fasciculul His și rețeaua Purkinje joacă mai ales rol de conducere, în timp ce nodulul sino-atrial este *pace-maker*-ul fiziologic dominant cardiac. Doar în condiții experimentale sau patologice, când nodulul sino-atrial este distrus sau inactivat, nodulul atrio-ventricular preia comanda frecvenței cardiace (ritm nodal). Când și acesta este scos din funcție, apare ritmul idioventricular, generat de fasciculul His și chiar de rețeaua Purkinje. Modelul experimental al ligaturilor lui Stanisius pe inima de poikiloterm constituie o bună ilustrare a modului în care caracteristicile funcționale ale etapelor unui sistem nodal pot fi studiate, prin întreruperea succesivă a conexiunilor funcționale intracardice.

Frecvența de descărcare a *pace-maker*-ului domoant (frecvența cardiacă) poate fi alterată dacă se schimbă durata depolarizării diastolice prin modificarea pragului de excitație, a pantei de depolarizare și a valorii potențialului diastolic maxim.

Stimularea parasimpatică și acetilcolina reduc frecvența cardiacă, prelungind durata depolarizării diastolice și măbind valoarea potențialului diastolic maxim (hiperpolarizarea). Această acțiune se explică prin

faptul că receptarii colinergici M (muscarinici) stimulați măresc conductanța membranei pentru K^+ . Simultan se produce și o scădere a excitabilității (creșterea pragului de excitație). Efectele sunt localizate în nodulul sino-atrial și atri.

Stimularea simpaticului crește frecvența cardiacă prin scăderea duratei depolarizării diastolice. Acest efect se explică prin faptul că activarea receptorilor adrenergici de tip beta crește permeabilitatea membranei pentru Ca^{2+} și K^+ prin influențarea schimbărilor Na^+-Ca^{2+} și a curentilor I_K și I_f .

Frecvența cardiacă reflectă echilibrul dintre cele 2 componente ale sistemului nervos vegetativ. În mod normal, frecvența cardiacă prezintă o marcată variabilitate, ea fiind mai accentuată în cazul predominanței tonusului vagal. Pierderea variabilității indică prezența unor stări patologice și creșterea riscului morții subite.

6.2.4. CONDUCTIBILITATEA (FUNCTIA DROMOTROPĂ)

Propagarea depolarizării prin structurile cardiace favorizează realizarea contracției miocardice și a funcției de propulsie a sângelui în circuitul vascular. În acest scop, este necesar ca atriile și ventriculele să se contracte într-o secvență bine definită, fapt ce presupune depolarizarea fiecărui compartiment la momentul potrivit (fig. 6.13).

Potențialul de acțiune cu originea în nodulul sino-atrial se propagă în toate direcțiile prin mușchii atrial, cu o viteză de $1-1,2$ m/s. La nivelul nodulului atrio-ventricular, conducerea este lentă și decremențială, atingând, în funcție de zonă, viteze de $0,02-0,1$ m/s, pentru un timp de conducere de $80-120$ ms. Datorită scăderii fluxurilor rapide de Na^+ , potențialul de acțiune la acest nivel își reduce amplitudinea, panta și viteza propagării, încetinindu-se până aproape de blocare. Aceste caracteristici justifică, de altfel, denumirea de marea sinapsă transversală a inimii.

Întârzierea propagării la acest nivel asigură terminarea sistolei atriale, înaintea începerii sistolei ventriculare. În acest mod se asigură umplerea ventriculară completă. În fasciculul His și ramurile sale, fibrele Purkinje asigură viteze mari de conducere ($1,2-2$ m/s). Potențialul de acțiune invadează aproximativ sincron zona subendocardică ventriculară, unde viteza atinge valori de cca 1 m/s. Propagarea continuă apoi spre epicard, cu o viteză de $0,35-0,40$ m/s.

Invasia ventriculelor de către unda de depolarizare are loc într-o secvență bine definită, fiind direcțională în general de la vârf spre bază (favorizând golirea) și cuprinzând epicardul ventriculului drept înaintea celui stâng. Depolarizarea inițială începe pe fața stângă a septului interventricular, spre apex, frotul unde (limita dintre fibrele depolarizate electronegative și cele polarizate electropozitive) fiind dirijat de la stânga spre dreapta și dinapoi înainte. În câteva ms depolarizarea invadează complet septul și cuprinde fața endocardică a ventriculului drept, lângă apex. În următoarele $5-10$ ms, depolarizarea cuprinde rețeaua Purkinje și apar zone subendocardice de mușchi depolarizat, care înconjoară ambele cavități ventriculare, cu excepția zonelor posterioare și superioare. La $10-15$ ms, depolarizarea cuprinde și fața epicardică anterioară a ventriculului drept. În același timp, în ventriculul stâng, unda progresează în grosimea peretelui. La cca 20 ms, se produce depolarizarea completă a ventriculului drept și a vârfului inimii, după care urmează depolarizarea completă a peretelui ventricular stâng și, în fine, depolarizarea bazei ventriculare. S-au descris mai multe fascicule funcționale care unesc diferite regiuni ale nodulului atrio-ventricular sau pe acesta cu fasciculul His și ventriculii, constituind suportul unei conduceri accelerate.

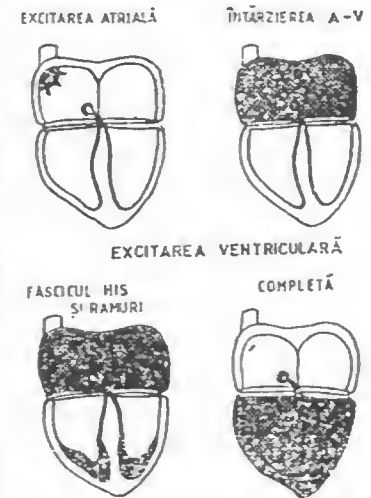


Fig. 6.13. Conducerea undei de excitație în miocard.

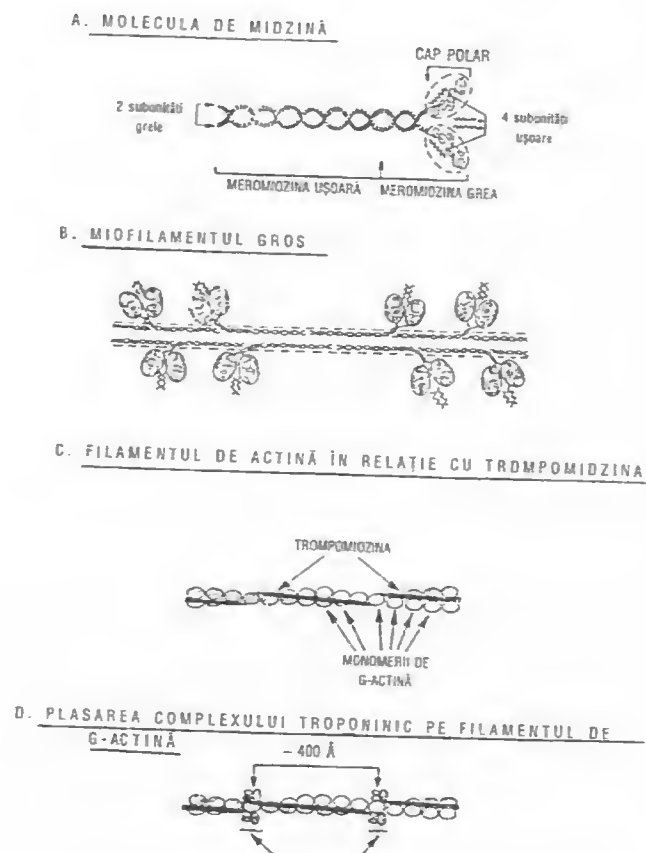


Fig. 6.16. Reprezentarea schematică a structurii moleculare a miofilamentelor groase (A, B) și subțiri (C, D).

Imediat, datorită hidrolizei ATP, puntea transversală se desface și revine în poziție perpendiculară pe direcția filamentului de miozină, refăcând o nouă legătură cu locusul următor de pe actină. Prin succesiunea repetată a acestor fenomene, pentru numeroase punți transversale, la nivelul tuturor sarcomerelor, se produce alunecarea filamentelor subțiri în interiorul discurilor întinse și contracția întregii fibre musculare. Procesul încetează și relaxarea se produce în momentul în care concentrația calciului liber din sarcoplasmă scade la nivelul de repaus, sub acțiunea mecanismelor descrise mai sus.

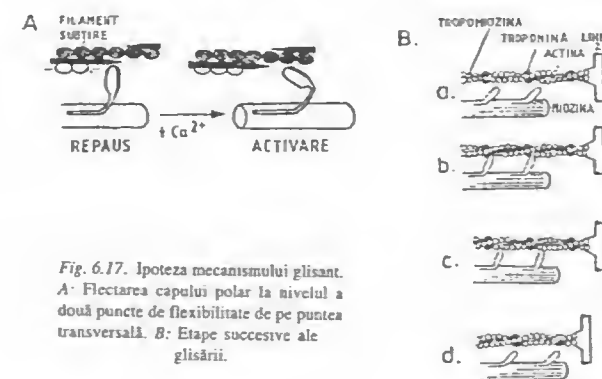


Fig. 6.17. Ipoteza mecanismului glisant. A: Flectarea capului polar la nivelul a două puncte de flexibilitate de pe puntea transversală. B: Etape succesive ale glisării.

Sistemul energogen miocardic. Sursa principală de energie în cursul activității cardiace este reprezentată de ATP. La nivelul mușchiului cardiac, refacerea ATP utilizat pe seama creatin fosfatului și a glicolizei anaerobe are o importanță redusă, datorită absenței enzimelor necesare. Sursa principală a ATP rămâne fosforilarea oxidativă mitocondrială, cuplată cu lanțul respirator (fig. 6.18.). În acest proces, atomii de hidrogen pierd electroni, transformându-se în protoni (H^+). Electronii transferați atomilor de oxigen determină activarea lor (O^{2-}), în final rezultând apă metabolică. La rândul lor, atomii de hidrogen provin din ciclul Krebs, în care substratul oxidat al CO_2 , H_2O și energie este acetil coenzima A. În fibra musculară cardiacă, sursa majoră de AcCoA (preferențială) este reprezentată de acizii grași liberi (AGL). În mod secundar, miocardul poate utiliza și acidul lactic și glucoza din sânge, dar acest mecanism intervine doar în cazul insuficienței căii majore.

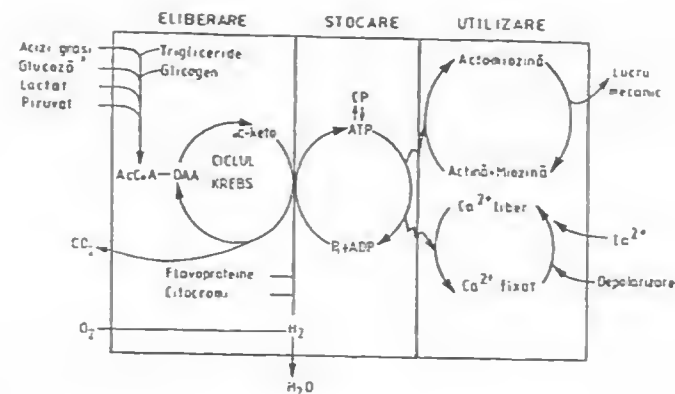


Fig. 6.18. Energetica mușchiului cardiac. AcCoA, acetil coenzima A. OAA, oxaloacetat. α -keto, α -ketoglutarat.

AGL, captați în fibra cardiacă prin difuziune, sunt activați în citoplasmă prin cuplare cu CoA. Acil CoA rezultat este transferată în mitocondrii, printr-un sistem de transport ce implică carnitina și două transferaze. La nivelul mitocondrial, prin beta-oxidare, acil CoA trece în AcCoA, nălizată în ciclul Krebs. Glucoza și acidul lactic, transformate în acid piruvic, pot, sub acțiunea unei piruvat dehidrogenaze, să formeze acetyl CoA. Enzima este însă continuu inhibată de excesul de AcCoA provenit din beta-oxidarea acizilor grași liberi (AGL).

Intensitatea reacțiilor metabolice intracelulare la nivelul celulei miocardice este permanent controlată de raportul ATP/ADP. Excesul de ADP stimulează glicoliza, activând fosfofructokinaza, stimulează ciclul Krebs la nivel de izocitrat dehidrogenază și, în fine, activează fosforilarea oxidativă. Excesul de ATP acționează frenator. Un alt factor de control metabolic ar fi aportul de oxigen. Insuficiența aportului de O_2 determină scăderea cantității de ATP și un exces de adenosină (catabolit purinic), care inhibă acil CoA sintetaza. În acest mod scade utilizarea AGL și se produce un efect inotrop negativ protector. Contractilitatea este redusă pentru a se adapta oxigenării locale, evitându-se astfel necroza celulară.

Datorită caracterului predominant oxidativ al metabolismului miocardic, inima este foarte sensibilă la hipoxie și la ischemie.

Reducerea fluxului sanguin poate duce la scăderea reversibilă a forței de contracție fără apariția necrozei celulare, fenomen denumit hibernare. Disfuncția contractilă este atribuită reducerii amplitudinii mișcărilor Ca^{2+} , fără scăderea sensibilității miofilamentelor la Ca^{2+} și fără modificări ale fosfajilor anorganici și ale pH.

Ischemia poate produce tulburări legate nu numai de scăderea oxigenării, ci și prin lipsa îndepărtării metaboliților și supraîncărcarea cu Ca^{2+} , ceea ce duce la contractură, inhibiția metabolismului mitocondrial, depleția de ATP, blocarea pompelor ionice, pierderea integrității membranelor celulare și, în final, la moartea celulară.

În aceste cazuri reperfuția precoce este o condiție absolut necesară supraviețuirii celulare, deși ea poate duce uneori și la leziuni necrotice.

Stunning-ul miocardic este definit ca o disfuncție mecanică postischemică ce persistă după reperfuție în absența unor leziuni ireversibile. Ea este total reversibilă, fiind distinctă de infarctul miocardic sau de starea de hibernare. Starea de *stunning* a fost atribuită mai multor mecanisme: generarea de radicali liberi ai O_2 , disfuncția mitocondrială, producția insuficientă de energie.

Precondiționarea ischemică se referă la creșterea toleranței la ischemie în urma mai multor episoade ischemice. În producerea preconditionării, un rol important îl au adenosina și activarea canalelor de K^+ dependente de ATP. Hipotermia amplifică protecția realizată de preconditionarea ischemică.

6.2.5.1. Caracteristicile contracției mușchiului cardiac

Ca și în cazul mușchiului scheletic, contracția miocardică se caracterizează prin forță (tensiunea dezvoltată) și viteză (viteza de scurtare). Dacă în fibra miocardică izolată forța și viteza depind exclusiv de mecanismele înrînsi moleculare ale contracției, în mușchiul cardiac luat în întregime prezența elementelor conjunctive elastice, precum și restul particularităților structural-funcționale ale organului condiționează desfășurarea contracției (fig. 6.19).

a) „Starea activă”. În condiții constante, stimulii supraliminari determină întotdeauna același grad de interacțiune între moleculele de actină și miozină, care încetează să mai fie liber extensibile, fie că dezvoltă o tensiune, fie că determină scurtarea sarcomerului. Această interacțiune, caracteristică elementelor contractile moleculare din interiorul fibrelor miocardice, a fost descrisă sub denumirea de „stare activă” (Hill, 1939). Starea activă, ca și în cazul mușchiului striat, reflectă capacitatea intrinsecă de contracție a mușchiului cardiac, independent de manifestările externe ale contracției (lucru mecanic, scurtare, întinderea elementelor elastice). Intensitatea și durata stării active sunt direct proporționale cu numărul legăturilor transversale și, respectiv, durata menținerii lor. Cei doi parametri reflectă, prin urmare, evoluția în timp a eliberării calciului în citoplasmă, a fixării sale pe troponina C și a recaptării sale în depozite. În mușchiul

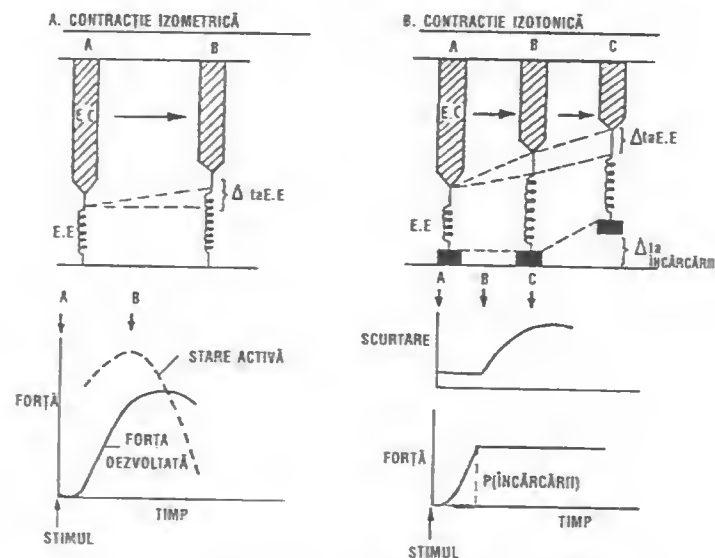


Fig. 6.19. Secvența fenomenelor mecanice în cursul contracției. A: În contracția izometrică, diferența dintre curba stării active și cea a forței dezvoltate se datorează punerii în tensiune a elementului elastic (E.E). B: În contracția izotonică, scurtarea începe după ce s-a dezvoltat forța necesară punerii în tensiune a elementului elastic (E.E) de către elementul contractil (E.C). At, diferența între cele două poziții. P, lucrul mecanic rezultat.

scheletic, intensitatea stării active este întotdeauna maximă, stimularea determinând creșteri enorme ale concentrației calciului liber, care duc la formarea unui număr maxim posibil de punți transversale. În mușchiul cardiac, stimularea determină creșteri limitate ale concentrației calciului. Acest fapt permite creșteri sau scăderi ale intensității „stării active”, în diferite condiții (efecte inotrop- pozitive, respectiv, inotrop-negative). Și în ceea ce privește durata „stării active” apar diferențe între mușchiul scheletic și cel cardiac. În mușchiul cardiac, durata este mult mai mare decât în cel scheletic, favorizând dezvoltarea unei forțe mai mari.

b) Parametrii contracției în fibra musculară izolată. Forța și viteza de contracție a fibrei miocardice depind de gradul și viteza de scurtare a sarcomerului. Acestea depind, la rândul lor, de lungimea inițială a sarcomerului (gradul de întrepătrundere a filamentelor subțiri cu cele groase, de care depinde numărul maxim de punți transversale ce se pot forma în momentul respectiv) și de capacitatea contractilă a fibrei sau „starea inotropă” (viteza și intensitatea cuplării excitație-contracție, viteza de interacțiune actină-miozină, capacitatea de utilizare a ATP). Între acești parametri se stabilesc o serie de relații, importante pentru înțelegerea caracteristicilor contracției cardiace.

Relația forță-viteză: la aceeași lungime inițială a sarcomerului, forța și viteza sunt invers proporționale. Viteza de contracție este maximă la încărcare nulă și scade pe măsură ce încărcarea crește. Cu cât forța dezvoltată este mai mare, cu atât viteza de contracție se reduce. Viteza poate fi crescută

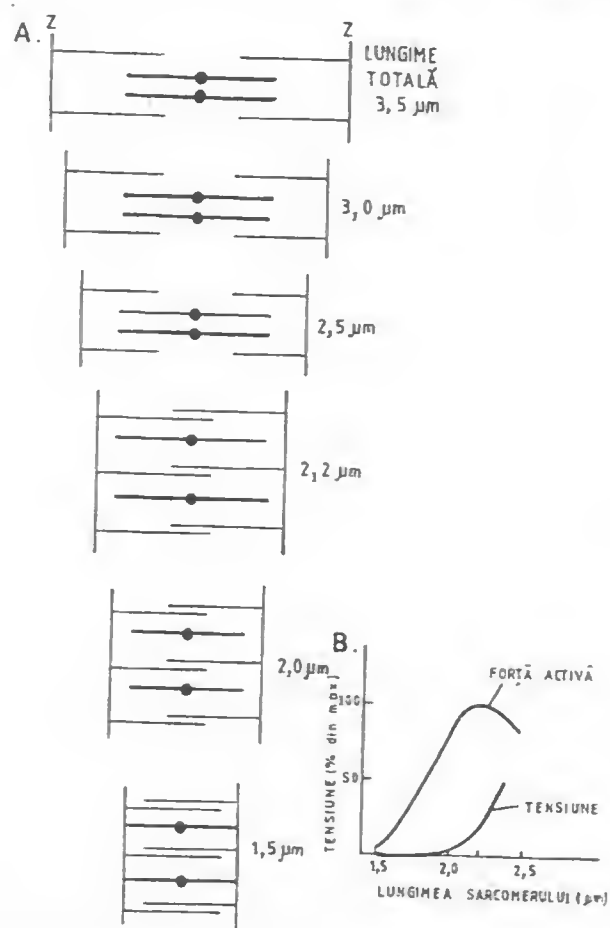


Fig. 6.20. Relația forță — lungimea sarcomerului. A: Poziția relativă a filamentelor de actină și miozină la diferite lungimi ale sarcomerului. B: Curba relației forță — lungime inițială a sarcomerului.

în prezența unor factori externi inotrop-positivi. De exemplu, adrenalina, calciul, digitala, glicozidele cardiace, accelerând influxul de calciu, măresc viteza contracției miocardice.

Relația forță-lungimea inițială a sarcomerului: lungimea inițială a sarcomerului condiționează numărul maxim de punți transversale acto-miozinice ce se pot forma și, în consecință, forța dezvoltată. Miofilamentul de miozină are o lungime totală de cca 1,5 μm . Din această lungime, porțiunea centrală corespunzând benzii H (0,2 μm) nu prezintă, spre deosebire de rest, legături transversale. Numărul maxim

de legături transversale se poate forma, prin urmare, atunci când filamentele de actină (1 μm) pătrund printre filamentele de miozină, până la limita benzii H. În aceste condiții, lungimea sarcomerului va fi egală cu suma lungimii a două filamente de actină opuse, plus lungimea corespunzătoare benzii H (0,2 μm). La această lungime de 2,2 μm se realizează totalitatea legăturilor transversale posibile, iar forța contracției sarcomerului este maximă (fig. 6.20 A, B).

La lungimi mai mari (până la 2,5 μm), forța contractilă scade proporțional cu numărul de punți transversale. La lungimi mai mici (până la 1,5 μm), filamentul de actină ajunge în jumătatea opusă a miofilamentului de miozină și realizează un număr suplimentar de legături transversale. Aceste legături acționează însă în sens opus celor inițiale, așa că, în final, forța de contracție se reduce.

Faptul că forța de contracție crește proporțional cu lungimea inițială a sarcomerului reprezintă baza ultrastructurală a legii fundamentale a inimii — legea Franck-Starling. Conform acestei legi, forța musculară a inimii crește proporțional cu distensia mușchiului cardiac sub acțiunea încărcării presistolice cu sânge. În acest mod, inima devine capabilă să asigure permanent evacuarea ventriculară, adaptându-se în limite fiziologice la creșterea întoarcerii venoase sau la creșterea rezistenței arteriale.

Relația viteză-lungime: viteza de contracție a fibrei musculare se apreciază prin viteza maximă de scurtare (la sarcina 0) și prin timpul de atingere a acestei viteze maxime. Viteza maximă de scurtare, care poate fi atinsă în cursul unei contracții (la sarcină 0 sau constantă), depinde de lungimea inițială a sarcomerului, în limitele 1,6–2,0 μm . Viteza cu care se atinge însă această viteză maximă nu depinde de lungimea inițială a sarcomerului, ci de lungimea instantanee, în fiecare moment al scurtării, și de caracteristicile stării active a fibrei miocardice.

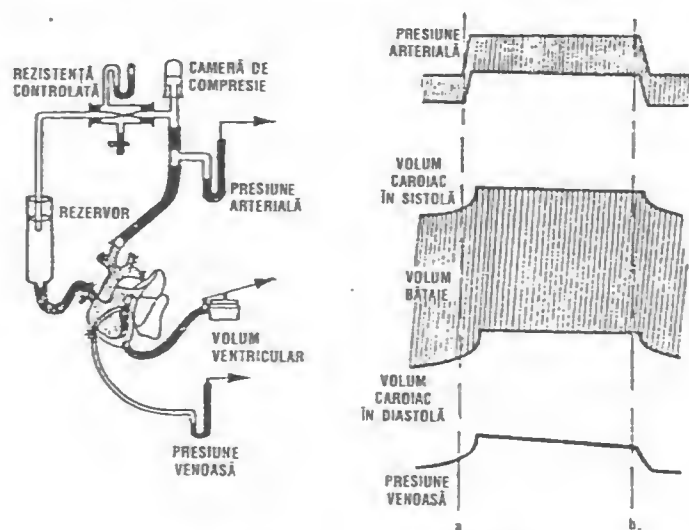
c) **Parametrii contracției miocardului în întregime.** Ca și în mușchiul striat scheletic, în mușchiul cardiac contracția se realizează cu participarea a trei componente.

1. elementul contractil (fibră miocardică), care în timpul activării se scurtează, dezvoltând forță, iar în condiții de repaus este extensibil;
2. elementul elastic în serie, care este întins pasiv prin scurtarea componentei contractile sau prin întinderea mușchiului;
3. elementul elastic în paralel, care menține lungimea de repaus a elementului contractil și contribuie la menținerea tensiunii de repaus (diastolice) a peretelui muscular cardiac. Acest element nu joacă un rol important în contracție.

Cu participarea acestor componente, contracția mușchiului cardiac se desfășoară astfel: în momentul stimulării, prin mecanismele cuplării excitației cu contracția, este indusă starea activă a elementului contractil (vezi și mai sus). Ca urmare, acesta devine capabil să se scurteze și să dezvolte forță. Într-un prim moment, forța se exercită asupra elementului elastic în serie. Scurtarea mușchiului și dezvoltarea forței mecanice apar cu o oarecare latență și evoluează în timp, în funcție nu numai de forța contractilă a fibrei musculare și de durata stării active, ci și de proprietățile componentei elastice. În contracția izometrică, forța se dezvoltă abia când scurtarea elementului contractil a întins elementul elastic, iar, în contracția izotonică, scurtarea întregului mușchi începe abia după ce scurtarea elementului contractil a întins elementul elastic până la atingerea unei tensiuni egale cu încărcarea. Ținând cont de aceste diferențe, relațiile forță-viteză-lungime, descrise în cazul fibrei miocardice, se păstrează și la mușchiul cardiac integral.

În cazul mușchiului ventricular intact, forța dezvoltată devine analogă cu presiunea, viteza de contracție corespunde vitezei de creștere a presiunii sau de evacuare a ventriculului, iar lungimea devine analogă cu volumul sau cu modificarea de volum (debitul bătăie). În aceste condiții se pot descrie relații similare celor de mai sus, și anume:

- **relația presiune-velocitate**, conform căreia, cu cât presiunea de evacuare (sarcina) este mai mare, cu atât viteza de evacuare a ventriculului este mai scăzută;
- **relația presiune-volum** (fig. 6.21 A, B, C), conform căreia, cu cât volumul ventricular inițial este mai mare (încărcare diastolică), cu atât forța dezvoltată va fi mai mare (presiunea intraventriculară izometrică va fi maximă). Din această relație rezultă că volumul bătăie ventricular (debit sistolic), la orice presiune aortică, depinde direct de gradul de umplere diastolică a inimii (legea fundamentală a inimii, Franck-Starling);
- **relația volum-velocitate**, conform căreia, cu cât volumul de sânge intraventricular scade, cu atât crește viteza de atingere a presiunii izometrice maxime și a evacuării ventriculare.



A. PREPARATUL CORD-PULMON

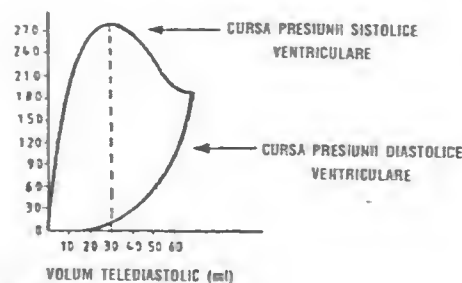
B. ÎNREGISTRAREA EFECTELOR
CREȘTERII (a) ȘI SCĂDERII (b)
REZISTENȚEI ARTERIALEC. RELATIA LUNGIME-TENSIUNE
ÎN COROUL ÎNTREG

Fig. 6.21. Legea fundamentală a inimii (Frank-Starling).

Existența acestor relații și acțiunea lor concomitentă au importante consecințe funcționale. Reprezentând tridimensional relațiile de mai sus, se pot înțelege mai ușor consecințele unor modificări funcționale asupra parametrilor activității cardiace, cum ar fi volumul bătaie (volumul sângelui evacuat în sistolă), forța sistolică (produsul presiune \times velocitate) și lucrul mecanic *per* bătaie (presiune \times volum bătaie).

Creșterea presiunii intraventriculare la sfârșitul diastolei (prin creșterea volumului de sânge conținut) determină creșterea volumului bătaie, a forței și a lucrului mecanic sistolic (vezi și legea inimii, mai sus).

Creșterea contractilității (a stării active) sub acțiunea unor factori inotrop-pozitivi (de exemplu, noradrenalină) determină creșteri ale vitezei și presiunii izometrice maxime dezvoltate și duce la creșteri ale forței lucrului mecanic și vitezei de ejeție sistolică.

Creșterea frecvenței cardiace, ducând doar la creșterea vitezei contracției ventriculare, determină creșterea forței de contracție fără modificări ale lucrului mecanic și ale debitului sistolic.

Creșterea presiunii arteriale (a sarcinii), având drept consecință scăderea vitezei inițiale de scurtare și reducerea acestei scurtări, determină scăderea volumului bătaie (mărind volumul de sânge rezidual postsistolic), în timp ce lucrul mecanic și forța sistolică cresc.

6.2.6. TONICITATEA (FUNCȚIA TONOTROPĂ)

Este proprietatea mușchiului cardiac de a păstra o anumită tensiune a pereților musculari și în timpul diastolei. Persistă și după denervarea sau scoaterea din organism. Lungimea sarcomerelor în diastolă este în general mai mică decât lungimea optimă de contracție (2,2 μ m). La realizarea tonusului cardiac participă două componente: o componentă intrinsecă, reprezentată de tensiunea elementelor contractile și elastice, și o componentă extrinsecă, reprezentată de influențele nervoase vegetative, în special de tonusul simpatic. În simpaticotonii, tonusul cardiac diastolic crește. Denervarea reduce o parte din tonusul cardiac fără a-l aboli. Starea de tensiune a pereților cardiaci în timpul diastolei condiționează forța de contracție sistolică, conform legii inimii descrise de Frank și Starling (vezi mai sus).

6.3. MANIFESTĂRILE ACTIVITĂȚII CARDIACE

Activitatea cardiacă se exteriorizează printr-o serie de fenomene de natură mecanică, acustică, volumetrică, electrică.

6.3.1. FENOMENELE MECANICE – REVOLUȚIA CARDIACĂ

Rolul de pompă al inimii se realizează datorită unor variații presionale ritmice din interiorul sistemului tetracameral cardiac. Aceste variații presionale sunt consecința unor contracții (sistole) și relaxări (diastole), a căror succesiune ciclică formează *revoluția cardiacă*.

Etapele și fenomenele revoluției cardiace au fost descrise pentru prima oară în 1628, de către Harvey, prin observarea directă a activității inimii, la diferite specii. Etapa modernă, de măsurare a diferiților parametri ce variază în timpul unui ciclu de activitate cardiacă, a început la sfârșitul secolului trecut, ca urmare a introducerii cateterismului cardiac de către Chauveau și Marey, care au măsurat prima oară, pe inima de cal, presiunile intracavitare și din arterele mari.

Metodologia de explorare a evenimentelor ciclului cardiac este foarte variată:

a) *Metodele sângerânde (directe)* sunt reprezentate de cateterismul cardiac. Acesta constă în măsurarea directă a variației presiunilor intracavitare în cursul revoluției cardiace, cu ajutorul unor sonde (catetere), introduse în inimă pe calea vaselor periferice. Cateterismul inimii drepte se realizează introducând sonda prin vena jugulară sau femorală. Cateterismul inimii stângi presupune introducerea (mai dificilă) a sondei prin artera radială. Concomitent se realizează și cineangiografiile mono- sau biplanară, prin injectarea de substanțe de contrast.

a) *Metodele nesângerânde (indirecte)* aduc informații cu privire la revoluția cardiacă, prin înregistrarea unor manifestări externe. Din această categorie fac parte: *apexograma* (înregistrarea „pulsului cardiac” generat la nivelul vârfului inimii, prin contactul variabil al acestuia cu peretele toracic, utilizând traductori mecano-

electrici); *flebograma* (înregistrarea variațiilor de volum venos în golful jugulariei – consecință directă a variațiilor de presiune în atriu drept); *sfigmograma* (înregistrarea pulsului arterial – consecință a evacuării ventriculare) etc.

b) *Alte metode* – în studiul revoluției cardiace s-au utilizat și alte metode, cum ar fi: determinarea debitului cardiac (pe baza principiilor Fick și Stewart); *electrocardiograma* (înregistrarea variațiilor de potențial ale mușchiului cardiac în cursul revoluției cardiace); determinarea variației volumului cardiac; *fonocardiograma* (înregistrarea zgomotelor cardiace).

Interpretarea în funcție de timp a înregistrărilor obținute simultan prin aceste tehnici, *metoda poligrafică* (fig. 6.22), permite o descriere detaliată a evenimentelor revoluției cardiace în succesiunea lor.

Locul acestor metode este luat în prezent de noile metode imagistice care urmăresc grosimea și mișcările pereților inimii, ca și mărimea cavităților acesteia și fluxul sanguin la nivelul orificiilor valvulare. Dintre aceste metode amintim echocardiografia uni-, bi- sau tridimensională sau echocardiografia Doppler, tomografia computerizată ultrarapidă, rezonanța magnetică nucleară și tomografia emisivă cu pozitroni.

Revoluția cardiacă fiziologică. Având o durată de cca 0,8 s pentru o frecvență de 70 bătăi/minut, revoluția cardiacă începe cu sistola atrială, ce are o durată de 0,10–0,15 s. După această perioadă de contracție, mușchiul atrial rămâne relaxat (diastola atrială), până la începerea unei noi revoluții (cca 0,7 s). Imediat după terminarea sistolei atriale începe sistola ventriculară (0,27–0,30 s), care asigură pomparea sângelui în sistemul arterial. După terminarea sistolei, ventriculul intră în relaxare (diastolă ventriculară) pentru un interval de aproximativ 0,5 s, până la următoarea sistolă ventriculară. Imediat după terminarea sistolei ventriculare, atât atriile, cât și ventriculele se află în diastolă. Această perioadă de relaxare a întregului mușchi cardiac, care durează până la următoarea sistolă atrială, poartă denumirea de diastolă generală și are o durată de aproximativ 0,4 s pentru o frecvență cardiacă de 70 bătăi/minut. Prin urmare, în cursul revoluției cardiace se succedă: sistola atrială, sistola ventriculară și diastola generală, după care ciclul se reia.

1. **Sistola atrială.** La sfârșitul diastolei generale, orificiul atrio-ventricular este deschis. Anabele cavități sunt umplute cu sânge, presiunile fiind sensibil egale, valoarea de referință fiind cea a presiunii barometrice la nivelul auriculului drept, cu manometrul menținut la jumătatea grosimii toracelui (pentru subiecții în clinostatism). Cum capacitatea atrială este ceva mai mare decât cea ventriculară (140 ml în atriu stâng față de 120 ml în ventriculul stâng pe cordul post-mortem), cantitatea de sânge aflată în atriul este suficientă pentru a asigura umplerea ventriculară completă. Autoexcitarea automată a nodulului sinoatrial generează unda de depolarizare, ce se propagă prin mușchiul atrial și care pe electrocardiogramă (ECG) generează unda P. Depolarizarea atrială determină, cu o latență de câteva sutimi de secundă, contracția mușchiului atrial. Datorită contracției, presiunea din atri crește timp de 0,1 s cu câțiva mm coloană de mercur (unda a pe auriculograma presiunii intracavitare atriale). Sângele din atri este presat în ventricule, unde determină, de asemenea, o ușoară creștere a presiunii (unda a pe ventriculograma presiunii intracavitare ventriculare), cele două cavități comunicând larg. Sistola atrială determină umplerea completă a ventriculului, contribuind cu aproximativ 30% din volumul diastolic final ventricular. Restul de 70% din acest volum curge pasiv din atri în ventricule în timpul diastolei generale (vezi și mai jos). Creșterile presiunilor din atri, care sunt reflectate și în ventricule, sunt de aproximativ 6–8 mmHg pentru inima stângă și 4–7 mmHg pentru inima dreaptă. Creșterea presiunii din atri se exercită nu numai în sens anterograd, spre ventricule, ci și în sens retrograd, spre vene afluențe (cave și pulmonare), reprezentând un obstacol ce se opune curgerii libere a sângelui din vene în atri. Afluxul venos se reduce și sângele se acumulează în venele mari, determinând distensia acestora (unda a pe flebograma înregistrată la nivelul golfului jugulariei). La sfârșitul sistolei atriale, mușchiul atrial se relaxează și presiunea intraatrială scade, unda a luând un curs descendent. În acest moment presiunea intraatrială tinde să se reducă sub valorile presiunii intraventriculare. Ca urmare, sângele ventricular începe să se întoarcă spre atri, determinând așa-zisa închidere „precoce” a valvei atrio-ventriculare, care precedă cu foarte puțin sistola și chiar depolarizarea ventriculară (complexul QRS de pe ECG). În timpul sistolei atriale, valvele atrio-ventriculare sunt deschise, dar cupele lor nu sunt împinse total spre peretele ventriculului, ci plutesc într-o poziție intermediară. Această poziție este rezultatul echilibrului ce se stabilește între presiunea exercitată de fluxul de sânge ce vine din atri și presiunea exercitată pe fața ventriculară de vârtejurile care, reflectate de peretele ventricular, tind să închidă valvele. Apozitia presistolă a valvelelor nu este completă, reținându-se abia în momentul sistolei ventriculare.

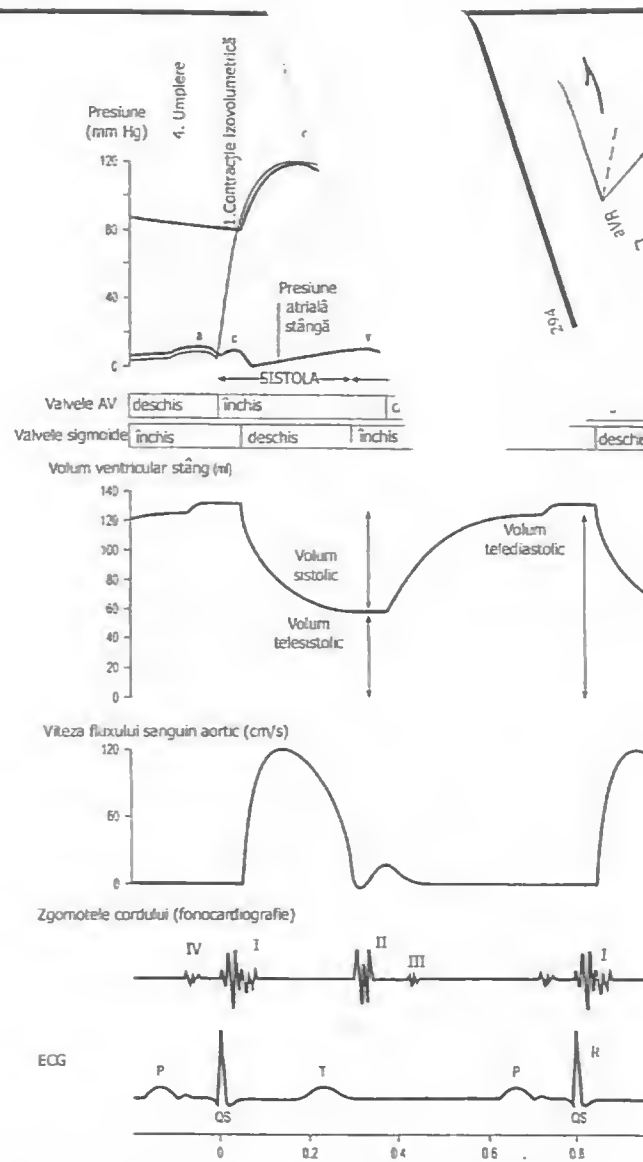


Fig. 6.22. Manifestările poligrafice din timpul ciclului cardiac.

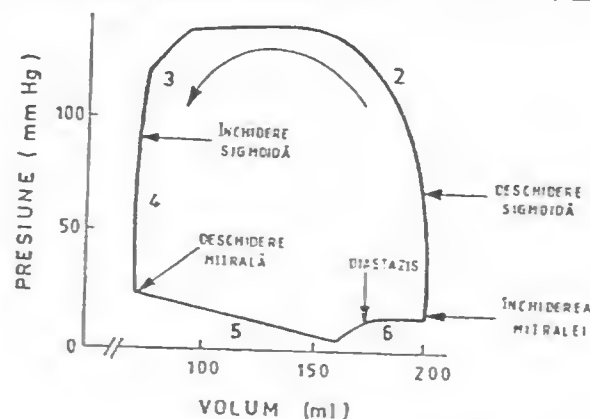


Fig. 6.23. Ciclu presiune-volum al ventriculului stâng.

2. **Sistola ventriculară.** Datorită întârzierii conducerii atrio-ventriculare la nivelul nodulului atrio-ventricular, contracția ventriculară începe după terminarea sistolei atriale. Tot datorită particularităților de conducere, depolarizarea și contracția ventriculară încep de la vârf și progresează spre bază (vezi mai sus). Particularități morfo-funcționale fac ca sistola ventriculară stângă să difere de cea a ventriculului drept.

Ventriculul stâng, având o formă aproximativ cilindrică, cu o porțiune conică la vârf, are pereți foarte groși și fibre cu dispoziție circulară, în marea lor majoritate. Din acest motiv, contracția sa este de tip concentric, implicând reducerea diametrului transversal și doar în mică măsură reducerea diametrului longitudinal sau mișcări de rotație. Într-o astfel de structură, reducerea de volum se realizează proporțional cu pătratul razei. Masa musculară implicată fiind mare, rezultă că ventriculul stâng este bine adaptat funcției de a asigura evacuarea volumului sistolic sub presiunile mari necesare în marea circulație, pe care o deservește.

Ventriculul drept, cu un perete relativ subțire, are formă aproximativ triunghiulară, cu peretele intern reprezentat de suprafața bombată a septului interventricular. Peretele extern subțire și cu suprafața mare față de volum se scurtează în timpul sistolei, apropiindu-se de peretele intern care este fix. Această mișcare, de tip excentric, asigură ventriculului drept capacitatea de a evacua volumul sistolic necesar sub un regim de joasă presiune, adaptat micii circulații. În afara acestei contracții excentrice (în „foaie de fierărie”), la eiecția sângelui din ventriculul drept mai contribuie reducerea evidentă a axului longitudinal, prin coborârea bazei spre vârf și contracția mușchiului ventricular stâng, care mărește convexitatea peretelui intern septal al ventriculului drept. În desfășurarea sistolei ventriculare se descriu mai multe faze:

a) **Faza izametrică** (izovolumetrică, de punere în tensiune, de mulare). Are o durată de cea 0,05 s. În momentul în care depolarizarea a cuprins vârful inimii (unda R pe ECG, la 0,04 s după începutul complexului QRS) începe contracția ventriculară. Presiunea intraventriculară crește și, depășind presiunea din atri, determină închiderea completă a valvulelor atrio-ventriculare. Ventriculul devine astfel o cavitate închisă între cele două valvule, care îl izolează de atri și de arteră. Pe măsură ce numărul fibrelor contractate crește, presiunea intraventriculară urcă rapid, cu o viteză ce atinge un maximum la sfârșitul acestei faze. Volumul sângelui nu se modifică (fază izovolumetrică), în schimb ventriculul își modifică forma prin reducerea diametrului transversal, concomitent cu creșterea celui longitudinal – datorită împingerii în sus a valvulei și întregului planșeu atrio-ventricular. Ca urmare a proeminării planșeului atrio-ventricular spre cavitatea atrială, volumul acestuia se reduce, presiunea crescând în mod corespunzător (fig. 6.23).

Această creștere presională, ca și în cazul unde *a*, se reflectă în circulația venoasă. Afluxul de sânge din venele mari este temporar oprit și volumul venelor mari crește din nou (unda c pe flebogramă). Faza

izovolumetrică se încheie în momentul în care presiunea intraventriculară, depășind presiunea din arterele mari, determină deschiderea valvulelor sigmoide și eiecția sângelui în circuitul corespunzător. În acest moment, presiunea aortică care a scăzut continuu încă de la începutul diastolei, datorită curgerii sângelui din artere spre periferie, atinge valoarea sa cea mai scăzută (presiune arterială minimă, diastolică): 65–70 mmHg în aortă și 10–12 mmHg în pulmonară.

b) **Faza izotonică** (de eiecție, evacuare) începe odată cu deschiderea valvulelor sigmoide de la baza aortei și pulmonarei și durează aproximativ 0,27–0,30 s. În acest moment se depolarizează și ultimele fibre ventriculare (unda S pe ECG) și mușchiul ventricular dezvoltă forța de contracție maximă. În funcție de variațiile presionale și ale fluxului sanguin ejectat în cursul fazei izotonice au fost descrise două perinade succesive: faza de eiecție rapidă și faza de eiecție lentă.

– Faza de eiecție rapidă: imediat după deschiderea valvulelor sigmoide, propulsia sângelui din ventricul în arterele mari depășește cu mult curgerea sângelui din aortă spre periferie. Din acest motiv, presiunea intraventriculară crește rapid odată cu cea din artere, atingând valoarea maximă sistolică (120–140 mmHg în aortă și 20–25 mmHg în pulmonară) și menținându-se la valuri puțin mai mari în ventricule. Această perioadă durează aproximativ 0,09–0,11 s. Viteza de eiecție a sângelui în aortă crește rapid, atingând valoarea de 1 mm/s (debit maximal de 0,4–0,5 l/s).

– Faza de eiecție lentă: din momentul în care curgerea sângelui din aortă spre periferie începe să depășească fluxul de sânge ejectat de ventricul, presiunea ventriculară scade ușor sub nivelul celei aortice. Deși are loc împotriva unui gradient presinhal inversat, evacuarea sângelui continuă, probabil sub acțiunea forței inerțiale, cu o viteză ce se reduce treptat. Presiunile ventriculară și aortică se reduc și ele. Această fază durează aproximativ 0,15–0,20 s, încheind sistola ventriculară.

Evacuarea sângelui ventricular se realizează, în această etapă, prin micșorarea semnificativ a volumului cavității ventriculare. Fibrele miocardice se scurtează cu aproximativ 33%, grosimea peretelui crește și volumul cavității scade cu aproximativ 50–70%. De la un volum de 150–200 ml, la sfârșitul diastolei, la un adult sănătos (volum telediastolic), se ajunge la un volum telesistolic de 50–70 ml. Diferența de 100–130 ml corespunde volumului sanguin ejectat. Evacuarea se realizează mai ales prin reducerea diametrului transversal dar și, în oarecare măsură, a diametrului longitudinal. Reducerea acestuia din urmă realizează o coborâre a planșeului atrio-ventricular care, măbind cavitatea atrială, reduce presiunea din interior, aspirând sângele din vene. Această scădere a presiunii intraatriale determină unda negativă x pe auriculogramă și se reflectă în reducerea volumului venelor mari (unda negativă x pe flebogramă).

Evacuarea ventriculară corespunde perioadei de depolarizare totală a ventriculului (segmentul izoelectric S-T pe ECG) și repolarizării (unda T pe ECG). Faza ia sfârșit de obicei după, sau odată cu unda T.

3. **Diastola generală.** Această fază a sistolei ventriculare începe din momentul în care fibrele miocardice, complet repolarizate, încep să se relaxeze. Și în cursul diastolei generale se pot distinge mai multe faze:

a) **protadiastala** marchează începutul relaxării ventriculare și durează 0,02–0,04 s. Este un moment dificil de localizat cu precizie pe ventriculogramă. Datorită relaxării miocardului, presiunea intraventriculară continuă să scadă sub nivelul celor aortice și pulmonare. Se produce un scurt flux retrograd al sângelui, care închide valvulele sigmoide. Acest moment marchează limita dintre protodiastolă și faza următoare. În momentul închiderii valvulelor sigmoide, peretele arterial, destins în timpul eiecției, începe să revină, propulsând sângele spre periferie. Presiunea aortică crește momentan (unda derivată);

b) **relaxarea izovolumetrică** (izametrică) durează 0,04–0,06 s. Valvulele sigmoide și atrio-ventriculare fiind închise, ventriculul este din nou o cavitate izolată. Relaxarea peretelui ventricular determină o scădere rapidă a presiunii intracavitare. La valori foarte scăzute, în jur de, sau chiar sub, 0 mmHg (vid postsistolic). Planșeu atrio-ventricular, coborât în timpul eiecției (vezi mai sus), revine în poziție normală.

În atriul deja umplut cu sânge aspirat din venele mari în timpul deflecției negative x (vezi mai sus), această revenire a planșeului determină o creștere ușoară a presiunii (unda pozitivă v pe auriculogramă), ce se reflectă într-o nouă creștere de volum a venelor mari, prin ușoară stază venoasă (unda pozitivă v pe auriculogramă). În această perioadă, în interiorul ventriculelor rămâne o cantitate de sânge neevacuat în timpul sistolei (volumul restant), care poate reprezenta 30–50% din volumul total (telediastolic), adică 50–70 ml sânge la un adult sănătos;

c) *relaxarea izotonică*: în timp ce presiunea intraventriculară scade, presiunea atrială crește. În momentul în care se atinge vârful unei vatriale, cele două presiuni se intersectează, presiunea intraventriculară coborând sub nivelul celei atriale. Ca urmare, valvulele atrio-ventriculare se deschid și începe curgerea sângelui din atri în ventricule. Umplerea ventriculară evoluează în două etape succesive:

- *umplerea ventriculară rapidă* durează 0,11 s. Sângele acumulat în atri curge rapid în ventriculele relaxate. Ca urmare, presiunea intraatrială scade abrupt, iar aspirația sângelui din vene determină o nouă scădere a volumului venos (unda negativă r pe auriculogramă și flebogramă). Presiunea intraventriculară crește pe măsura umplerii cu sânge;

- *umplerea ventriculară lentă* durează aproximativ 0,19–0,20 s și începe din momentul în care presiunile din atri și ventricule s-au egalizat, durând până la începutul unei noi sistole atriale. Influxul de sânge în cavitatea comună atrio-ventriculară este foarte lent, presiunea și volumul rămânând practic constante (*diastolis*).

6.3.2. FENOMENELE ACUSTICE ÎN CURSUL REVOLUȚIEI CARDIACE

În cursul activității mecanice a inimii sunt generate zgomote, a căror succesiune în timp constituie așa-zisa revoluție cardiacă stetacustică (clinică). Într-o descriere sumară, este vorba despre succesiunea a două zgomote principale, ușor de recunoscut: zgomotul I (sistolic) și zgomotul II (diastolic). Zgomotul I (0,1 s) este urmat de o scurtă perioadă de liniște („mica tăcere” – 0,2 s), după care se produce zgomotul II (0,05 s), urmat de un nou interval („marea tăcere” – 0,4 s), până la zgomotul I consecutiv.

Zgomotele cardiace pot fi urmărite fie prin metoda *auscultației directe*, cu pavilionul urechii aplicat pe toracele subiectului, fie prin metoda *fonendoscopice* (auscultație cu ajutorul stetoscopelor care, în general, elimină sunetele de joasă frecvență), în anumite focare de auscultație (fig. 6.24).

Cea mai precisă și nu foarte laborioasă metodă este însă metoda fonocardiografică. Cu ajutorul unor microfoane plasate pe suprafața toracelui, se preiau undele sonore și se transformă în oscilații electromagnetice, care după o amplificare-filtrare corespunzătoare pot fi vizualizate și înregistrate pe fonocardiogramă.

Zgomotele cardiace se caracterizează prin durată, înălțime (frecvență), intensitate (amplitudine) și timbru (numărul armonicilor supraadăugate).

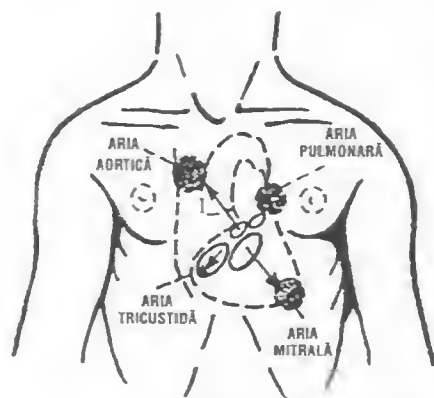


Fig. 6.24 Focare de auscultație ale zgomotelor cardiace.

Pe fonocardiogramă se disting patru zgomote cardiace, dintre care numai unele pot fi ascultate de examinator la nivelul toracelui (fig. 6.25)

Zgomotul I (sistolic) este un zgomot grav, prelung și puternic, cu o durată de 0,08–0,10 s. Fonocardiografic este format din 9–13 oscilații, cu o frecvență variabilă de 30–100 Hz. La geneza acestor vibrații participă sângele, miocardul și valvulele cardiace ce alcătuiesc așa-zisul sistem vibrator cardio-hemic. Vibrațiile sonore apar fie ca urmare a accelerării bruște a sângelui, fie ca urmare a frânării (decelerării) bruște a sângelui ce întâlnește un obstacol (perete, valvulă). În ambele cazuri se formează curenți turbionari (turbulență) ce produc vibrații, la care se adaugă vibrația obstacolului (perete muscular relaxat sau contractat, valvule închise). Oscilațiile zgomotului I formează trei grupuri care se succed în timp și cu origini diferite:

- *grupul inițial (A_1)* are o frecvență și o intensitate foarte joase, precedă creșterea presiunii intraventriculare și se datorează accelerării sângelui ventricular spre atri, la începutul sistolei ventriculare;

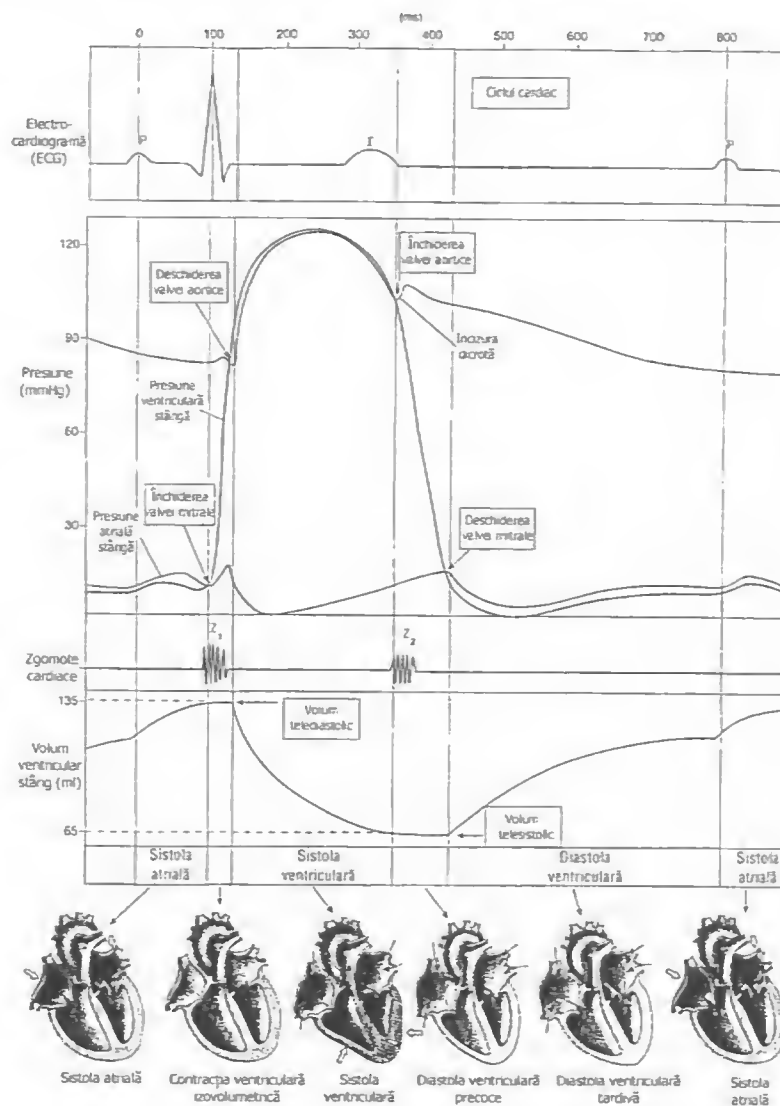


Fig. 6.25 Relațiile dintre manifestările ECG, fonocardiografice, volumice și presiunale intracavitare din timpul ciclului cardiac (după Silverthorn, 2001).

- *grupul principal* este format din două componente, adesea reunite, și anume *componenta valvulară* (A_1), generată de oprirea bruscă a sângelui accelerat spre atri, în momentul închiderii valvulelor atrio-ventriculare, când presiunea intraventriculară începe să crească; a doua, *componenta sanguină* (A_2), ce se asociază cu deschiderea valvulelor sigmoide și se datorează ejecției inițiale a sângelui în aortă. Întâlnind rezistența coloanei de sânge existente în trunchiul arterial, acest jet inițial este brusc decelerat. Se pare că în acest moment se produc câteva oscilații aorto-ventriculare antero-și retrograde;

- *grupul terminal* (A_3) de oscilații este generat probabil de turbulența jetului de sânge propulsat continuu prin aortă și, respectiv, pulmonară.

Focarul optim de auscultație pentru zgomotul I se află în spațiul V intercostal stâng, la intersecția cu linia medioclaviculară. La nivelul acestei arii de proiecție a vârfului inimii, predomină elementul mitral (inima stângă). Tot pentru zgomotul I, dar de origine tricuspida, focarul optim de auscultație se află în spațiul V intercostal drept, pe marginea dreaptă a sternului. Intensitatea zgomotului depinde de viteza cu care crește presiunea intraventriculară, în faza izometrică. Creșterea presiunii diastolice sistemice sau pulmonare mărește intensitatea zgomotului (de exemplu, în tahicardie), în timp ce scăderea acestei presiuni determină reducerea intensității (de exemplu, în bradicardie). Volumul sângelui expulzat nu pare să influențeze intensitatea vibrației.

Zgomotul II (diastolic) este un zgomot scurt, clar, lovit, care apare la începutul diastolei, imediat după vârful undei T pe ECG, în momentul în care pe înregistrarea presiunii aortice se înregistrează accidentul dirot. Are o durată de 0,025–0,050 s și o frecvență de 50–200 Hz. Fonocardiografic este format din 4–5 oscilații, ce pot fi grupate astfel:

- un *grup inițial*, format din câteva oscilații de joasă frecvență (inaudibile), determinate de decelerarea și întoarcerea spre ventricul a fluxului sanguin chiar înaintea închiderii valvulelor sigmoide;

- un *grup principal*, generat de închiderea și tensionarea bruscă a valvulelor sigmoide, care determină frânarea bruscă a coloanei de sânge dirijate spre ventricul. Aceste vibrații se transmit prin inelele valvulare și mușchiul ventricular.

Focarul optim de auscultație pentru zgomotul II se află în spațiul II intercostal drept (aortă) și stâng (pulmonară), chiar lângă marginea corespunzătoare a sternului. Zgomotul II aortic precedă de obicei cu puțin zgomotul II pulmonar. Acest decalaj este accentuat în inspirul profund, când întoarcerea venoasă crescută prelungește durata ejecției sângelui din ventriculul drept. În expir, situația se inversează. Creșterea efluxului venos din teritoriul pulmonar prelungește evacuarea ventriculului stâng. Intensitatea zgomotului II crește odată cu creșterea presiunii arteriale sistemice sau pulmonare.

Zgomotul III (diastolic) poate fi ascultat uneori la adulții tineri, ca un sunet slab, ce apare în regiunea apexului, la cca 0,08 s după zgomotul II. Poate fi accentuat prin manevre ce măresc întoarcerea venoasă în atri (efort fizic, decubit dorsal). Are o durată de 0,03–0,04 s și este format din 1–4 oscilații, cu frecvență joasă, 50–100 Hz. Apare în momentul deschiderii valvulelor atrio-ventriculare, când sângele ce trece rapid din atriile pline în ventriculele relaxate este brusc decelerat de contactul cu peretele ventricular.

Zgomotul IV (atrial) este inaudibil la normali, coincide cu sfârșitul undei P pe ECG și unda *a* pe auriculogramă. Este format din 1–2 oscilații de foarte joasă frecvență (15–20 Hz) și are o durată de 0,02–0,03 s. I s-a descris, prin fonocardiografie intracardiacă, două componente: prima componentă, care coincide

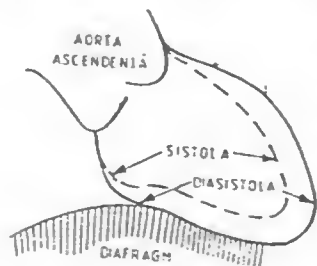


Fig. 6.26. Conturul ventriculului stâng în sistolă și diastolă (după date cineangiocardigrafice).

cu unda atrială *a*, își are originea în atriile ce se contractă; a doua componentă apare în ventricule și se datorează fie fluxului sanguin, care accelerat în atri este brusc decelerat în ventricule, fie inversării gradientului presional atrio-ventricular, la sfârșitul sistolei atriale (închiderea presistolică a valvulelor atrio-ventriculare).

Modificări ale zgomotelor cardiace. Alterările fiziologice, dar mai ales de natură patologică, ale activității cardiace pot determina fie modificarea zgomotelor cardiace normale, fie apariția unor zgomote supraadugate (murmure cardiace). În funcție de caracterul lor stetacustic, murmurile cardiace se pot descrie ca sufluri sau uruituri. Câteva exemplificări pot ilustra aceste aspecte, subliniind importanța lor în diagnosticul clinic al afecțiunilor cardiace.

Hipertensiunea arterială, sistemică sau pulmonară, determină creșterea intensității zgomotului I, în focarele respective de auscultație. Efortul fizic sau anemia gravă determină creșteri ale vitezei de ejecție în artere, putând duce la murmur sau sufluri supraadugate, ce sunt considerate a fi „funcționale”.

Leziunile valvulare (insuficiența sau stenoza), reprezentând factori de turbulență a fluxului sanguin, generează modificări caracteristice. Stenoza mitrală, de exemplu, modificând curgerea sângelui din atri în ventricule, determină apariția unui murmur diastolic (uruitură) la vârful inimii. Insuficiența mitrală, permițând întoarcerea unui jet de sânge din ventricule în atri, determină apariția unui suflu sistolic caracteristic. Cele două manifestări stetacustice se combină, generând manifestările acustice caracteristice bolii mitrale, în care cele două defecte valvulare apar simultan.

6.3.3. FENOMENELE VOLUMETRICE ÎN CURSUL REVOLUȚIEI CARDIACE

Fenomenele mecanice din cursul revoluției cardiace determină modificări corelate ale formei și volumului inimii în funcție de presiunile intracavitare și ejecția sângelui (fig. 6.26). Variațiile volumului cardiac și ale diferitelor dimensiuni în cursul unui ciclu de activitate au fost determinate cu ajutorul cardiografiei extracardiacă (utilizând traductoare mecano-electrice, fixate experimental intracavitar sau pe suprafață), al pletismografiei cardiace și, în fine, prin metodele radiologice neinvazive ale cardioangiografiei cu substanțe de contrast sau ale echocardiografiei.

Cu aceste metode s-au putut determina dimensiunile și volumul ventricular în cursul activității organului (tabelul 6.1).

TABELUL 6.1

Variațiile volumului și dimensiunilor ventriculare în diferite faze ale revoluției cardiace

Fazele revoluției cardiace	Diastolă		Sistolă atrială	Sistolă ventriculară		
	Umplere rapidă	Diastazis		Izometrică	Evacuare rapidă	Evacuare lentă
Volum ventricular	creștere rapidă	constant	creștere ușoară	constant	scădere rapidă	creștere lentă
Diametrul sau circumferința externă	creștere rapidă	constant	practic constant	creștere	scădere	scădere lentă
Înălțimea externă	creștere rapidă	constant	practic constant	crește ușor	scădere	scădere lentă
Diametrul intern	creștere rapidă	constant	practic constant	scade	scădere	scădere lentă
Înălțimea internă	creștere rapidă	constant	practic constant	crește ușor	scădere redusă	constantă

Aceste date, precum și examenele radiologice au demonstrat faptul că forma inimii devine globuloasă în timpul sistolei izometrice, în timp ce grosimea transversală a mușchiului cardiac crește rapid, atingând un maximum în timpul ejecției ventriculare (20–25%).

Dilatația cardiacă. În condiții fiziologice, orice modificare a ejecției cardiace poate determina creșteri moderate ale volumului cardiac, cu efectele inotrop-pozitive ce rezultă din legea Franck-Starling. În condiții patologice, aceste creșteri ale volumului miocardic pot deveni imponente și permanente, având efecte negative asupra activității cardiace.

Dilatațiile cardiace acute (consecința unui efort circulator supraliminar etc.) se realizează prin alungirea sarcomerelor, alunecarea longitudinală a fibrelor cardiace unele față de altele și reorganizarea stratificării acestor fibre. Creșterea lungimii sarcomerelor peste lungimea optimă de 2,2 μ m determină scăderea forței de contracție, în timp ce mărimea suprafeței interne a cavităților determină necesitatea aplicării unei forțe crescute, pentru menținerea regimului presional normal.

Hipertrofia cardiacă. Suprasolicitarea mecanică de durată a inimii determină în timp o creștere a masei mușchiului cardiac. Dacă greutatea inimii la normali este de 250–350 g, la atleți și în munca fizică grea se pot atinge greutatea de 500 g (hipertrofie cardiacă „funcțională”). În unele boli cronice se pot atinge greutatea de până la 1 000 g. Hipertrofia cardiacă este rezultatul creșterii dimensiunilor fibrelor miocardice individuale și a cantității de țesut necontractil. Fibrele musculare cardiace din cordul cu hipertrofie prezintă creșteri de diametru și lungime, precum și un număr mai mare de sarcomere, miofibrile și mitocondrii. Vascularizația rămâne normală (raportul fibre/capilare este de 1:1), crescând doar lungimea capilarelor. În hipertrofiile accentuate crește și rezistența coronară periferică.

Hipertrofia cardiacă apare ca urmare a creșterii travaliului cardiac, fie prin aflus sanguin crescut (insuficiență valvulară, anemii, efort fizic), fie prin creșterea rezistenței la evacuarea sângelui (stenoză valvulară, hipertensiune sistemică sau pulmonară) și, în fine, în cursul dilatației cardiace. Creșterea consumului energetic cardiac și activarea consecutivă a proceselor metabolice determină probabil activarea sintezei de proteine, ce duce la hipertrofie. Uneori, hipertrofia este însoțită și de hiperplazie (creșterea numărului de fibre miocardice), după cum cordul și-a pierdut complet sau nu capacitatea de diviziune miocitară.

Față de inima normală, miocardul hipertrofic nu este o simplă versiune „mai mare”, ci prezintă importante modificări morfologice și funcționale. Creșterea masei musculare se poate realiza excentric, ca în cazul încărcărilor de volum, în care cavitatea se mărește, dar grosimea pereților rămâne nemodificată, sau concentric, ca în cazul încărcărilor de presiune, când pereții se îngroașă, iar volumul telediastolic nu se modifică.

Hipertrofia cardiacă indusă de efortul fizic este considerată hipertrofie „fiziologică” și se caracterizează prin creșterea capacității de a dezvolta forță, spre deosebire de hipertrofiile patologice, în care aceasta este scăzută.

Deprimarea contractilității ar putea fi adaptatională, pentru că scăderea vitezei de contracție este favorabilă unei contracții mai eficiente și mai economice.

Sinteza proteică este accelerată și modificată calitativ printr-o exprimare anormală a genelor care modifică raportul dintre mitocondrii, miofibrile, reticulul sarcoplasmatic și proteinele sarcolemale. Oxigenarea deficitară se însoțește de modificări ale metabolismului glucidic și lipidic și alterarea cineticii fosforilării oxidative.

Pe măsură ce unele celule miocardice mor, ele sunt înlocuite de fibroblaști, a căror creștere duce la apariția fibrozei, care participă, și ea, la instalarea hipertrofiei, dilatației și a remodelării ventriculare.

6.4. CONSECINȚELE FUNCȚIONALE ALE ACTIVITĂȚII CARDIACE

Activitatea contractilă ritmică a mușchiului cardiac, reflectată în variațiile presiunii intracavitare și tensiunii pereților cardiaci, determină debitul sanguin cardiac, ce este propulsat prin prestarea lucrului mecanic cardiac.

6.4.1. PRESIUNILE INTRACAVITARE ÎN CURSUL REVOLUȚIEI CARDIACE

În dinamica revoluției cardiace, presiunile intracavitare și în teritoriile vasculare corespunzătoare prezintă variații sistolo-diastolice bine determinate (tabelul 6.11).

Presiunea intraventriculară dezvoltată de miocard pe unitate de suprafață endocardică (P) se corelează cu tensiunea (forța) dezvoltată circumferențial pe unitate de suprafață transmiodică (T). Această relație poate fi exprimată cantitativ utilizând legea Laplace, care se aplică oricărei membrane distensibile, de formă circular sau cilindrică.

$$\bar{T} = (\bar{P} \times \bar{r})/2 \bar{h} \quad (1) \quad \text{sau} \quad \bar{P} = (\bar{T} \times 2 \bar{h})/\bar{r} \quad (2)$$

în care \bar{T} și \bar{P} sunt valorile medii ale tensiunii și respectiv presiunii, \bar{r} este raza medie a ventriculului în sistolă, iar \bar{h} – grosimea peretelui ventricular. Din relația (2) rezultă că presiunea intraventriculară dezvoltată în sistolă va fi cu atât mai mare, cu cât tensiunea peretelui va fi mai mare.

La această tensiune, în afara factorului activ (contracție), mai contribuie distensia pasivă, reprezentată de umplerea diastolică optimă, și rezistența, reprezentată de presiunea arterială. Creșterea grosimii miocardului (\bar{h}) și scăderea volumului cavității (\bar{r}) vor favoriza de asemenea dezvoltarea unor presiuni intraventriculare mari. Astfel se explică, de exemplu, de ce în dilatația cardiacă pentru menținerea presiunii normale de ejecție este necesară dezvoltarea unei tensiuni crescute. În această situație, viteza de ejecție a sângelui (viteza de scurgere) va fi redusă. În cursul hipertrofiei cardiace la sportivi, creșterea grosimii peretelui miocardic, în condițiile în care presiunea sistolică, tensiunea pereților și raza ventriculului rămân normale, determină, în conformitate cu legea Laplace, o reducere mai accentuată a diametrului ventricular (\bar{r}) în cursul sistolei. Astfel se explică creșterea debitului sistolic de repaus, caracteristică stării de antrenament. În schimb, în cazul hipertrofiei cardiace la hipertensivi, îngroșarea peretelui se însoțește de o tensiune parietală crescută, ca urmare a presiunii arteriale sistolice crescute. În aceste condiții, diametrul cavității ventriculare scade foarte puțin în cursul sistolei, iar debitul sistolic nu se modifică, sau chiar se reduce.

TABELUL 6.11

Valorile presiunilor sistolo-diastolice intracardice și în unele teritorii vasculare (mmHg)

	Sistolă	Diastolă
Atriu drept	4–6	±2
Ventricul drept	22–30	0–2
Artera pulmonară	22–30	7–12
Capilare pulmonare	8–12	4–8
Atriu stâng	6–8	0–2
Ventricul stâng	120–140	0–2
Aortă	120–140	70–90

6.4.2. DEBITUL CARDIAC

Fiecare sistolă ventriculară propulsează în artera aortă și, respectiv, în pulmonară câte 60–70 ml de sânge (debit sistolic sau volum bătaie). La un ritm sinus normal, de cca 70 bătăi/minut, inima va expulza pe minut un volum de 5–6 litri de sânge, atât în marea, cât și în mica circulație. Debitul cardiac (minut-volumul) va fi, prin urmare, produsul volum bătaie \times frecvență cardiacă/minut și va depinde direct de cei doi termeni ai relației. Creșterile, în limite fiziologice, ale frecvenței cardiace, vor determina creșteri de debit cardiac, iar scăderile vor acționa în sens invers. La rândul său, debitul sistolic va fi condiționat de umplerea diastolică a ventriculului și de ejecția sistolică a sângelui. Umplerea sistolică crescută determină

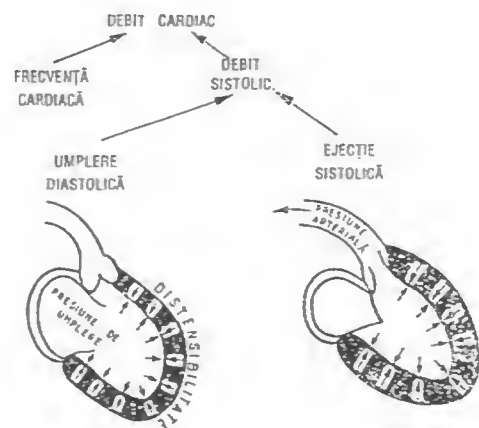


Fig. 6.27. Factorii determinanți ai volumului bătăie.

mărirea debitului sistolic și, prin aceasta, a debitului cardiac. Umplerea diastolică depinde pe de o parte de presiunea de umplere, determinată de întoarcerea venoasă și volumul sângelui restant din sistola precedentă (presarcină). Pe de altă parte, umplerea ventriculului este condiționată și de complianța (distensibilitatea) peretelui ventricular (fig. 6.27). Creșterea întoarcerii venoase (efort fizic) sau creșterea volumului sângelui restant (postsarcină) ce ridică umplerea diastolică măresc debitul cardiac. În schimb, scăderea umplerii diastolice prin reducerea complianței peretelui (scleroză miocardică, pericardită, expir) determină scăderi ale debitului cardiac. Ejejecția sistolică, direct proporțională cu debitul cardiac, este influențată de postsarcină, contractilitatea miocardului și rezistența periferică (presiunea arterială) care i se opune.

Determinarea debitului cardiac. În condiții experimentale, determinările de debit cardiac se pot realiza cu ajutorul unor debitmetre de diferite tipuri.

Pentru determinarea debitului cardiac mediu în aortă, se utilizează: rotametre (cu flotor, deplasat de fluxul sanguin); turbinometre (microturbină care, antrenată de sânge, generează un semnal electric) sau termostromuhr (termocuplu care măsoară disiparea energiei termice de către fluxul sanguin).

Pentru determinarea variațiilor fazice de flux (sistolo-diastolice) se utilizează: debitmetrul de presiune diferențială (care măsoară căderea de presiune după trecerea printr-un orificiu calibrat); debitmetrul cu pendul (care măsoară mecano-electric deplasarea unui pendul, a unui fir de păr sau metalic, sub acțiunea fluxului sanguin); debitmetrul cu ultrasunete (bazat pe principiul sonarului); debitmetrul electromagnetic (care măsoară curentul indus de sângele care se deplasează într-un câmp magnetic). Aceste metode presupun întreruperea integrității vaselor sau, cel puțin, plasarea intraoperatorie a sistemului, în imediat contact cu vasul de sânge. Doar debitmetrul electromagnetic a putut fi folosit la om cu titlu de excepție.

Necesitatea determinării în condiții clinice a debitului cardiac la om a determinat utilizarea unei game largi de tehnici:

a) **Metoda directă de dozare a gazelor respiratorii** se bazează pe principiul Fick (1882), care permite aprecierea volumului mediu de sânge ce traversează un organ sau o regiune, în care o substanță transportată este cedată sau captată. Debitul sanguin (D.S.) va fi egal cu debitul pierderii sau captării de substanță (Q_s ml/min), raportat la diferența arterio-venoasă a concentrației substanței (Dif. A-V).

$$D.S. (ml/min) = \frac{Q_s (ml/min)}{Dif. A-V (ml/100 ml sânge)} \quad (1)$$

În mod obișnuit, se determină debitul sanguin în teritoriul pulmonar, utilizând ca substanță indicatoare oxigenul captat din aerul inspirat. În acest caz relația de mai sus devine:

$$D.C. = \frac{QO_2}{Dif. A-V (O_2\%)} \quad (2)$$

în care D.C. este debitul cardiac al inimii drepte, QO_2 este consumul de O_2 pe minut, determinat spiografic sau chimic în aerul expirat, recoltat în saci Douglas, iar Dif. A-V se referă la creșterea concentrației de O_2 (%) după traversarea teritoriului pulmonar. Concentrația oxigenului în afluentul pulmonar fiind practic egală cu cea a sângelui arterial, determinarea sa se realizează prin oximetria unei probe recoltate din artera radială. În schimb, concentrația O_2 în artera pulmonară nu poate fi aflată decât prin dozarea în sângele venos amestecat, recoltat prin cateterism cardiac din ventriculul drept sau chiar din artera pulmonară. Cele două recoltări trebuie realizate simultan, pacientul aflându-se în condiții de echilibru (steady-state) metabolic și respirator. În condițiile menționate, la un adult sănătos, în repaus, consumul de O_2 va fi de 250 ml/min, concentrația de O_2 în sângele arterial va fi de 19%, iar în sângele venos amestecat – de 14%, diferența A-V atingând valori de 5%. Înlocuind în relația de mai sus, rezultă că (fig. 6.28).

$$D.C. = 250 \text{ ml/min} / 5\% \times 100 = 5000 \text{ ml/min}$$

Utilizarea CO_2 ca indicator pentru această determinare, deși posibilă, nu este indicată, având în vedere faptul că modificări nuci de ventilație determină variații mari ale dinamicii acestui gaz, starea de echilibru fiind foarte greu de atins.

Aplicarea cu maximum de acuratețe a metodei directe, bazată pe principiul Fick, permite scăderea limitelor de eroare sub 10%.

b) **Metoda Fick indirectă de dozare a gazelor respiratorii** s-a utilizat în încercarea de a evita dificultatea cateterismului cardiac. Una dintre variante este cea bazată pe dozarea CO_2 în aerul alveolar. Se

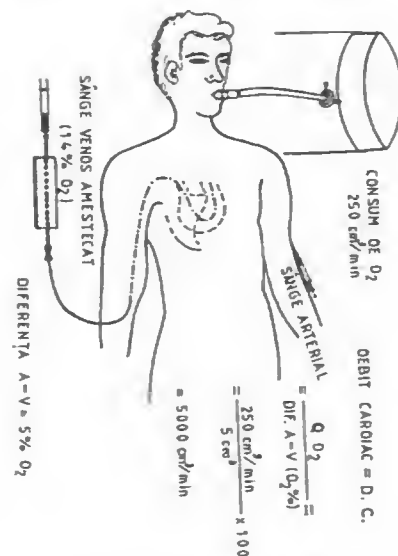


Fig. 6.28. Determinarea debitului cardiac cu ajutorul metodei Fick directe.

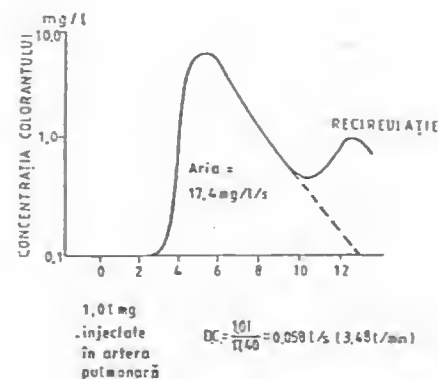


Fig. 6.29. Curba înregistrată prin metoda diluției unui indicator și calculul debitului cardiac în acest caz specific.

determină eliminarea CO_2 în aerul expirat, iar concentrația gazului în sângele arterial se află determinând presiunea parțială a CO_2 din aerul alveolar, care se presupune a fi în echilibru cu sângele arterial. Concentrația gazului în sângele venos amestecat se obține făcând pacientul să respire într-un circuit închis, de volum redus. În aceste condiții, după un interval de timp, presiunea parțială a CO_2 din sângele venos amestecat se va echilibra cu cea din aerul alveolar, care poate fi măsurată. Dificultatea metodei constă în stabilirea exactă a momentului când s-a atins starea de echilibru, care nu trebuie depășită. Tehnica poate da erori mari în stabilirea debitului cardiac.

c) *Metoda Fick indirectă, cu gaze străine organismului:* pacientul inhalează timp de 25 s un amestec de aer atmosferic cu un gaz inert, netoxic și foarte solubil. După intervalul menționat se măsoară cantitatea de gaz captată de plămân din circuit și concentrația sa alveolară. Se presupune că această concentrație este aceeași cu cea din sângele arterial și că recirculația sângelui nu a determinat concentrații semnificative de gaz în sângele venos. În acest mod se obțin toți parametri necesari calculării debitului cardiac, utilizând principiul Fick. S-au utilizat oxidul nitros (N_2O), iodura de etil și mai ales acetilena. Cum timpul de circulație (10–18 s) este mult mai redus decât cel necesar echilibrării alveolo-capilare (23–30 s), rezultatele obținute cu această tehnică au în general erori mari, fiind de obicei mai mici decât cele reale.

d) *Metoda diluției indicatorilor* se bazează pe principiul Stewart (vezi determinarea volemiei). Conform acestui principiu se poate determina debitul sanguin într-un teritoriu (după injectarea unei cantități cunoscute de substanță indicatoare la intrarea în teritoriu, se urmărește la cealaltă extremitate curba concentrației în funcție de timp).

$$\text{D.C. (l/min)} = \frac{Q (\text{cant. de substanță injectată în mg}) \times 60}{q (\text{conc. medie a substanței - mg/l}) \times t(\text{s})}$$

Indicatorii utilizați sunt coloranți (albastru Evans, cardiogreen, roșu de Congo) sau substanțe marcate cu izotopi (^{131}I , ^{51}Cr etc). Utilizarea este permisă de îndeplinirea următoarelor condiții: difuzibilitate redusă în afara patului vascular, inocuitate, simplitatea dozării.

Substanța se injectează rapid într-o venă cât mai apropiată de inimă (eventual prin cateter plasat în vena cavă inferioară). Recoltarea la nivelul arterei radiale se începe simultan cu injectarea, realizându-se în fracțiuni cât mai mici și într-o succesiune cât mai rapidă (la o secundă interval, timp de 30–40 s). Se determină concentrația în fiecare probă. Este de dorit ca determinarea concentrației să se facă continuu pe fluxul sanguin derivat printr-un cateter. Pe baza datelor obținute se construiește curba de evoluție a concentrației (fig. 6.29), până în momentul în care, după 15–20 s (timpul de circulație în repaus), apare o a doua creștere a concentrației (recirculația indicatorului).

Ramul descendent al primei curbe se extrapolează până la 0 și din datele astfel obținute se calculează concentrația medie a indicatorului în sângele efuent.

e) *Metoda termodiluției* se bazează tot pe principiul Stewart. Se injectează în atriu drept un volum cunoscut de ser fiziologic rece sau cald, la o temperatură cunoscută, și se înregistrează curba temperaturii amestecului sânge – ser, cu ajutorul unui termistor plasat în artera pulmonară. Se obține o curbă de diluție completă, fără recirculație, deoarece la o a doua trecere a sângelui s-a realizat echilibrarea termică. Debitul cardiac se calculează ca în cazul de mai sus.

f) *Metodele radiologice* permit determinarea angiocardiografică a diferențelor de contur cardiac în telesistolă, față de telediastolă. Diferențe de 50–60% corespund unui debit cardiac normal de repaus.

g) *Echocardiografia:* această metodă neinvazivă și lipsită de orice risc și disconfort are numeroase aplicații în explorarea funcțională cardiacă. Proiectând un fascicul de ultrasunete, în condiții standardizate de incidență, se înregistrează cu traductori adecvați ecoul – intensitatea, poziția, mișcarea undelor reflectate la interfața diferitelor regiuni de omogenitate diferită (fig. 6.30).

Se pot determina astfel: volumele ventriculare telediastolic și telesistolic, volumul bătaie și debitul cardiac, viteza medie de scurgere a circumferinței, viteza și masa peretelui ventricular posterior, apariția de lichid în cavitatea pericardică, structura valvulelor și mișcarea lor etc.

h) *Baliscardiografia* este o metodă de explorare bazată pe înregistrarea mișcării corpului sub acțiunea forțelor de recul generate de contracția cardiacă, eiecția sângelui în artere, propagarea unde

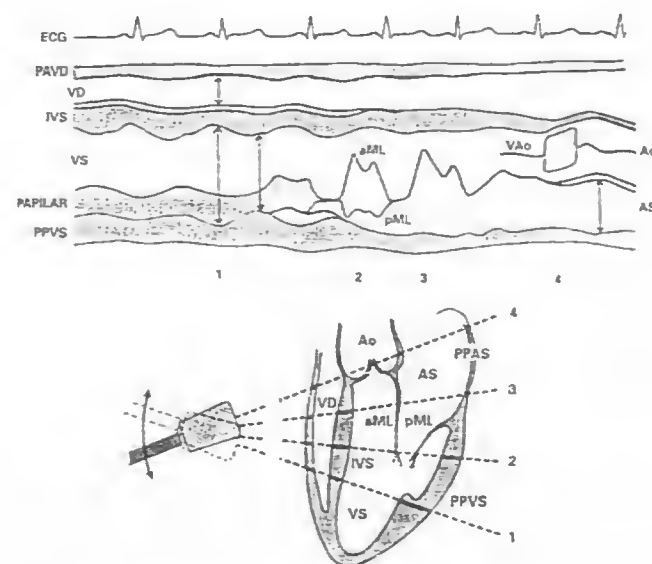


Fig. 6.30. Echocardiografia. PAVD, perete anterior ventricul drept. VD, ventricul drept. IVS, interiorul ventriculului stâng. VS, ventricul stâng. PPAS, perete posterior atriu stâng. PPVS, perete posterior ventricul stâng. Ao, aortă. AS, atriu stâng. Vao, volum aortic. aML, mișcarea cuspidului mitral anterior. pML, mișcarea cuspidului mitral posterior.

pulsatile. Se înregistrează mișcările în lungul axului longitudinal, la un pacient plasat pe o masă suspendată elastic pe traductori mecano-electrici (cristale piezoelectrice). Cu o amplificare corespunzătoare se înregistrează o serie de unde pozitive (în sens cranial) și negative (în sens caudal), notate cu H, I, J, K, L, M, N. Unda H (pozitivă) reflectă proiecția vârfului în sistola izometrică; unda I (negativă) este expresia eiecției izotonice în arterele mari; unda J (pozitivă) reprezintă rezultanta impactului coloanei de sânge care este decelerată în inimă, aorta ascendentă, artera pulmonară și accelerată în aorta descendentă; unda K (negativă) reflectă impactul sângelui ejectat cu rezistența periferică.

Deși metoda are limitări evidente, a fost posibilă corelarea empirică a diferitelor disfuncții cardiace cu aspecte caracteristice ale înregistrării. Metoda permite printre altele și evaluarea valorilor relative ale debitului cardiac și forței ventriculare.

i) *Metoda determinării debitului sistolic prin analiza curbei de presiune în aortă:* asemănând aorta cu un cilindru elastic, se poate considera că între volumul de sânge ejectat și presiunea maximă sistolică există o relație de directă proporționalitate. Această relație, care depinde de o serie de caracteristici individuale (capacitatea segmentului vascular, distensibilitatea, rezistența periferică etc.), permite aprecierea volumului bătaie prin înregistrarea oscilației presionale cu catetere plasate în aortă. În medie, se consideră că la o creștere a presiunii de 1 mmHg sânge/m² corespunde un debit sistolic de aproximativ 1 ml sânge/m² suprafață corporală.

Valorile debitului cardiac (exprimare, variații). Cum debitul cardiac variază de la un individ la altul în funcție de caracteristicile somatice, condițiile determinării și starea fiziologică, exprimarea în valori absolute nu este suficientă. Se utilizează curent, ca mod de exprimare, indicele cardiac = debit cardiac/m²

suprafață corporală, a cărei valoare normală este de aproximativ $3,2 \text{ l/m}^2$. Debitul cardiac se corelează foarte bine cu greutatea subiectului (W) în cadrul unei relații matematice de tipul $D.C. = W^{0,73}$. Valorile normale variază între 62 și 65 ml/kg corp . În condiții de repaus, debitul cardiac se corelează strâns și cu volumul sanguin (V.S.) al subiectului. Raportul $D.C./V.S.$, denumit și frecvență de circulație a volumului sanguin, are la normali, în repaus, o valoare de $1/\text{minut}$. De exemplu, dacă în cazul unui debit cardiac aparent mersul determinărilor indică creșterea volumului sanguin (retenție hidrică), atunci frecvența de circulație este scăzută și cordul se poate considera ca fiind insuficient.

Dacă la femeii normale debitul cardiac exprimat pe m^2 suprafață (indicele cardiac) nu diferă față de bărbați, în timpul sarcinii (din luna a 3-a) valorile debitului cardiac cresc, ajungând cu $30\text{--}40\%$ mai mari în lunile a 6-a \rightarrow a 7-a. În luna a 9-a valorile scad spre normal, dar aceste scăderi nu se observă decât în decubit dorsal, probabil datorită comprimării venei cave de către uterul gravid. Creșterea debitului cardiac în sarcină este proporțională cu cea a volemiei și mai mare decât cea a consumului de oxigen (care crește doar cu 10%). Aceste creșteri ale ejeției cardiace se însoțesc de creșteri ale unor debite locale (placental, renal, cutanat).

Debitul cardiac scade treptat, cu $0,25 \text{ l/m}^2$ pe deceniu, începând de la vârsta adolescenței (când valoarea sa este de $4,4 \pm 0,4 \text{ l/m}^2$). La adulți atinge valoarea de $3,5 \pm 0,3 \text{ l/m}^2$, iar la 80 de ani $2,4 \pm 0,2 \text{ l/m}^2$.

Determinarea debitului cardiac în poziție ortostatică sau șezând dă valori mai reduse decât în clinostatism (cu $15\text{--}30\%$).

Efortul fizic determină creșteri ale debitului cardiac proporționale cu cele ale consumului de oxigen. Debitul cardiac crește cu $5\text{--}6$ litri de sânge pentru fiecare litru de oxigen consumat suplimentar, putând atinge valori maxime de cca 30 l/minut în eforturi deosebit de intense. În decubit dorsal, efortul fizic determină creșterea debitului cardiac exclusiv prin creșterea frecvenței, debitul sistolic rămânând practic nemodificat. În poziția șezând și în ortostatism, volumul sistolic este mai redus în repaus, iar efortul fizic determină creșterea sa puternică, urmată de o stabilizare la niveluri maxime, apropiate de cele din cazul decubitului dorsal. Creșterea temperaturii centrale mărește debitul cardiac în funcție de tipul de solicitare termică. În mediu cald (temperatură ambiantă peste 40°C) și umed (umiditate relativă peste 80%) s-au observat creșteri ale debitului cardiac de repaus la 20 l/min . Creșteri de $30\text{--}40\%$ ale debitului cardiac apar și în cazul digestiei.

Stările de anxietate, cum sunt cele observate în expunerea subiecților la condițiile de laborator și spital, determină de asemenea creșteri ale debitului cardiac (însoțit de hiperventilație și alcaloză).

Debitul cardiac crește în stări patologice, cum ar fi hipertiroidia (creșteri ale consumului de oxigen) sau febră (hipertermie). În somn se produc scăderi cu $10\text{--}20\%$ ale debitului sistolic. Astfel de scăderi se vor produce și în situații patologice (de exemplu: insuficiență cardiacă).

6.4.3. LUCRUL MECANIC AL INIMII

Prin activitatea sa contractilă, inima prestează un lucru mecanic – parametru important în aprecierea capacității funcționale a organului. Se consideră că inima prestează două tipuri de lucru mecanic: extern și intern.

Lucrul mecanic cardiac extern (efectiv, total) reprezintă lucrul mecanic prestat de inimă pentru a propulsa volumul sistolic sanguin împotriva presiunii din artere.

Lucrul mecanic = debitul sistolic \times presiunea medie de ejeție.

În cazul ventriculului stâng, pentru un debit sistolic de 70 ml și o presiune aortică medie de 100 mmHg ($\frac{120+80}{2}$), lucrul mecanic sistolic va fi:

$$L_{\text{stg.}} = 70 \text{ ml} \times 100 \text{ mmHg} = 70 \text{ ml} (100 \times 3,6) \text{ mmHg} = 95,2 \text{ gm/sistolă.}$$

În cazul ventriculului drept, unde presiunea medie de ejeție este mai redusă, lucrul mecanic nu va depăși $20\text{--}25 \text{ gm/sistolă}$. În aceste condiții, lucrul mecanic sistolic cardiac pentru ambele ventricule va fi de cca 125 gm . La acest lucru mecanic ventricular trebuie să se adauge componenta cinetică (5% – cantitatea de lucru necesară accelerării sângelui în arteră), lucrul mecanic al atrilor ($5\text{--}8 \text{ gm}$) și lucrul mecanic efectuat pentru deplasări ale sângelui în alte direcții decât cea ortogradă (această valoare poate deveni importantă în situația unor insuficiențe valvulare, când sângele regurgitează în direcție inversă celei normale). Puterea dezvoltată de ventricul (lucrul mecanic/timp) va fi egală, pe minut, cu produsul: lucru mecanic sistolic \times frecvență cardiacă. În 24 de ore inima va presta $12\,000 \text{ kgm}$, în repaus, și $20\,000 \text{ kgm}$, în efort.

Lucrul mecanic cardiac intern reprezintă acea cantitate de lucru mecanic necesar depășirii inerției elementelor elastice în serie cu elementele contractile și dezvoltării tensiunii în acestea din urmă. Nu a fost cuantificat până în prezent.

Randamentul cardiac. Din cantitatea totală de energie consumată în cursul activității cardiace, doar o parte se exteriorizează sub formă de energie calorică. Exprimând consumul energetic al miocardului sub forma consumului de oxigen (QO_2), rezultă că:

$$\text{Randamentul cardiac (\%)} = \frac{\text{lucrul mecanic}}{\text{QO}_2}$$

În condiții normale, randamentul cardiac variază între $10\text{--}20\%$. Creșterea lucrului mecanic prin creșterea volumului sistolic (efort fizic ritmic la sportivi) se însoțește de un randament crescut ($30\text{--}40\%$). În schimb, creșterea lucrului mecanic pe seama creșterii presiunii medii de ejeție (hipertensiune arterială) duce la scăderi marcate ale randamentului.

6.5. FENOMENELE ELECTRICE ALE ACTIVITĂȚII CARDIACE. ELECTROCARDIOGRAMA (ECG)

Fenomenele electrice din cursul activității cardiace precedă în general cu $0,02 \text{ s}$ fenomenele mecanice pe care le declanșează. Înregistrarea și urmărirea acestor fenomene aduc informații vitale cu privire la geneza, propagarea și desfășurarea activității cardiace.

Electrocardiograma reprezintă înregistrarea (de obicei la suprafața corpului) a variațiilor de potențial ale vectorului rezultat din sumarea momentană, simultană și spațială a fenomenelor electrice de depolarizare și repolarizare a ansamblului de fibre miocardice în cursul unei revoluții cardiace.

În funcție de zona de plasare a electrozilor de culegere, metodele electrocardiografice pot fi directe sau indirecte. Metodele directe presupun contactul nemijlocit cu țesutul cardiac și sunt relativ puțin folosite în practica clinică. Din această categorie fac parte: electrocardiograma (electrograma) de suprafață, cu electrozi plasați direct pe suprafața inimii; electrocardiograma intracardiacă, în care electrozii sunt plasați intracavitar, prin cateterism; electrocardiografia intracelulară care, practică cu microelectrozi, înregistrează potențialul de acțiune transmembranar. Metoda indirectă, utilizând electrozi distanțați de inimă (la suprafața corpului), se folosește curent în practica clinică și va constitui obiectul principal al discuțiilor ce urmează.

Electrocardiograma (ECG) se înregistrează în principiu cu ajutorul electrocardiografelor formate dintr-un sistem de preluare a semnalului electric (electrozi), un sistem de filtrare-amplificare a semnalului preluat și un sistem de redare-înregistrare, utilizând oscilosoape catodice și/sau înregistratoare potențiometrice pe bărtie.

Prima electrocardiogramă a fost obținută în 1887 de Waller, cu ajutorul unui electrometru capilar. Bazele electrocardiografiei moderne au fost puse încă în 1903 de Einthoven, prin introducerea în practică a galvanometrului cu coardă, utilizat curent până la înlocuirea sa cu oscilografal cu amplificatori, în 1930.

6.5.1. PRINCIPIUL ELECTROCARDIOGRAFIEI

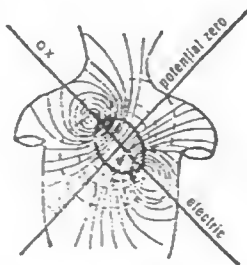


Fig. 6.31. Câmpul electric cardiac (după Jouve, 1954).

Electrocardiografia este posibilă datorită faptului că organismul se comportă ca un volum-conductor, în interiorul căruia se află o sursă de potențial variabil (mușchiul cardiac), ce generează un câmp electric variabil, care poate fi înregistrat cu electrozi plasați la suprafață (fig. 6.31).

Activitatea electrică a mușchiului cardiac își are originea în fenomenele electrice de depolarizare și repolarizare membranară ale fibrelor musculare cardiace. Se poate considera că, în orice moment al activității sale, miocardul este format din două categorii de fibre: (a) fibre depolarizate, a căror suprafață este electronegativă și (b) fibre neactivate, cu polaritate membranară de repaus, a căror suprafață este electropozitivă. Diferențele de potențial dintre cele două categorii de țesut se sumează complex, putând fi înregistrate pe suprafața inimii. Mai mult, ele se propagă electrotonic prin țesuturi și lichide, ajungând la periferia

organismului, unde, deși atenuate, se pot înregistra, formând ECG. Modificările de polaritate din cursul potențialului de acțiune al fibrelor miocardice reprezintă prin urmare cauza undelor înregistrate pe ECG. Acest fapt este demonstrat și de corespondența, observată experimental, dintre evoluția potențialului de acțiune înregistrat cu microelectrozi intracelulari în fibrele ventriculare și evoluția ECG înregistrată simultan pe suprafața aceluiași ventricul (fig. 6.32). Se observă că depolarizarea rapidă (faza 0) corespunde complexului rapid QRS, iar platoul (faza 2) și repolarizarea (faza 3) corespund segmentului ST și unde T pe ECG. Trebuie subliniat, cu riscul repetării, faptul că, deși legate cauzal, cele două fenomene au mecanisme diferite. Potențialul de acțiune este un fenomen transmembranar celular, în timp ce ECG este suma diferențelor de potențial dintre suprafețele celulelor polarizate și ale celor depolarizate.

Dipolul electric cardiac. Într-un mediu conductor, în care s-a creat o diferență de potențial, există două puncte de sarcină electrică opuse cu o diferență de potențial maximă, fiecare generând câte un câmp tridimensional de forțe electrice de sens opus (+ și -). Ansamblul astfel format se numește dipol electric.

Și în cursul activității cardiace, propagarea unde de excitație din aproape în aproape face ca în fiecare moment să coexiste, în condiții de proximitate, fibre depolarizate (electronegative) și fibre polarizate (electropozitive), alcătuind tot atâtea dipoli microscopici individuali. Sumarea acestor dipoli parțiali determină apariția unui dipol unic momentan, format din ansamblul fibrelor depolarizate în momentul respectiv, în opoziție cu ansamblul fibrelor polarizate în același moment. Se poate considera, prin urmare, că fiecare moment al activității cardiace este caracterizat printr-un dipol unic momentan, generator al unui câmp electric caracteristic.

Orice dipol în general, și cel cardiac în mod special, are o serie de caracteristici bine stabilite care, într-o succintă enumerare, sunt următoarele (fig. 6.33).

- **centrul electric**, reprezentat de cele două puncte de sarcină maximă și opuse ce creează câmpul electric;
- **axul dipolului**, reprezentat de linia ce unește cele două puncte ale centrului electric și pe direcția căreia se exercită diferența de potențial maximă;
- **liniile izo-(echi)potențiale** sunt liniile sau, mai exact, sferile concentrice ce unesc punctele care în fiecare câmp electric au potențiale egale; valoarea poate fi mai scăzută sau mai crescută decât cea de la centrul electric;

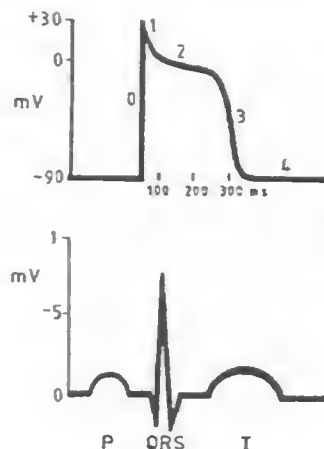


Fig. 6.32. Corespondența dintre traseul ECG (jos) și înregistrarea cu microelectrozi intracelulari a potențialului de acțiune într-o fibră miocardică ventriculară.

- **liniile de forță**, perpendiculare pe liniile izopotențiale, indică sensul exercitării forței electromotore în câmpul electric;

- **linia (planul) de potențial zero**, perpendiculară pe axul dipolului la jumătatea distanței dintre cele două puncte, reprezintă ansamblul punctelor de potențial zero și separă cele două câmpuri electrice.

Reprezentarea dipolului electric. Vectori electrice. Dipolul unic momentan cardiac, rezultat prin sumarea diferențelor de potențial miocardice instantanee, se caracterizează prin **direcție** (direcția aplicării forței electromotore maxime, generată de diferența maximă de potențial), **mărime** (valoarea diferenței de potențial maxime sumate) și **sens** (sensul de aplicare a diferenței de potențial maxime de la - spre +). Aceste caracteristici pot fi reprezentate printr-un vector momentan global (fig. 6.34).

În cursul activității cardiace, numărul, poziția și orientarea dipolilor variază continuu. Această variație poate fi reprezentată de un vector global cardiac, ce variază continuu ca sens, mărime și direcție. Înregistrarea variațiilor vectorului electric global cardiac formează ECG.

Înțelegerea acestui fapt are la bază experimente simple (Craib, 1927), care au demonstrat faptul că deplasarea unde de excitație de-a lungul unui fragment de miocard, scufundat în ser fiziologic, poate fi cel bine asemănată cu migrarea unui dipol în lungul fragmentului (fig. 6.35).

Chiar în modelele foarte simple de înregistrare a activității electrice a unui fragment de țesut scufundat într-un lichid fiziologic, aspectul înregistrării variază în funcție de plasarea electrozilor. Aceste diferențe sunt și mai evidente în cazul cordului *in situ*. Aspectul ECG variază în funcție de modul de culegere al potențialelor propagate (derivața ECG).

În electrocardiografie se utilizează două tipuri de derivații:

1. **derivațiile bipolare**, în care cei doi electrozi de culegere, unul pozitiv (explorator) și altul negativ (de referință), culeg diferențe de potențial dintre două puncte ale câmpului electric cardiac (în plan frontal);

2. **derivațiile unipolare**, în care electrodul pozitiv (explorator) măsoară diferența dintre potențialul punctului de culegere din câmpul electric cardiac și potențialul electrodului negativ (de referință), care este menținut la o valoare stabilă și cât mai apropiată de zero.

1. **Derivațiile standard bipolare ale membrelor** (fig. 6.36) au fost introduse în practica ECG de Einthoven (1908) sub denumirea de derivații I, II și III.

Derivația I, braț drept (-) → braț stâng (+), măsoară diferența dintre potențialul brațului stâng (VL) și cel al brațului drept (VR): $D I = VL - VR$.

Derivația II, braț drept (+) → gamba stângă (-), măsoară diferența dintre potențialul gambei stângi (VF) și cel al brațului drept (VR): $D II = VF - VR$.

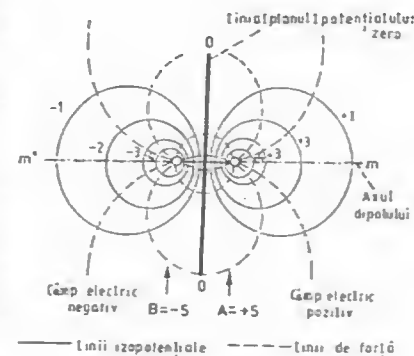
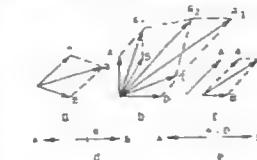


Fig. 6.33. Reprezentare schematică a unui dipol electric.

CARACTERISTICILE UNUI VECTOR



SUMAREA VECTORILOR MOMENTANI



SUMAREA VECTORILOR MOMENTANI ÎN CORD



Fig. 6.34. Reprezentare vectorială.

Derivația III, braț stâng (+) → gamba stângă (-), măsoară diferența dintre potențialul gambei stângi (VF) și cel al brațului stâng (VL): $D III = VF - VL$.

Polaritatea electrozilor a fost astfel stabilită de Einthoven încât, în cazul în care câmpul pozitiv al dipolului cardiac cuprinde umărul stâng, să producă o deflexiune pozitivă în derivația I, iar, dacă se orientează spre membrul inferior stâng, să producă o deflexiune pozitivă în derivațiile II și III. Cu alte cuvinte, derivațiile standard sunt astfel orientate, încât depolarizarea ventriculară să producă la normale o deflexiune pozitivă în toate derivațiile.

În circuitul închis reprezentat de cele trei derivații standard, se poate aplica legea a II-a a circuitelor (Kirchhoff), care în circuitul Einthoven devine $I - II + III = 0$ sau $II = I + III$. Deci, diferența de potențial înregistrată în derivația a II-a este egală cu suma potențialelor înregistrate simultan în celelalte derivații (regula Einthoven).

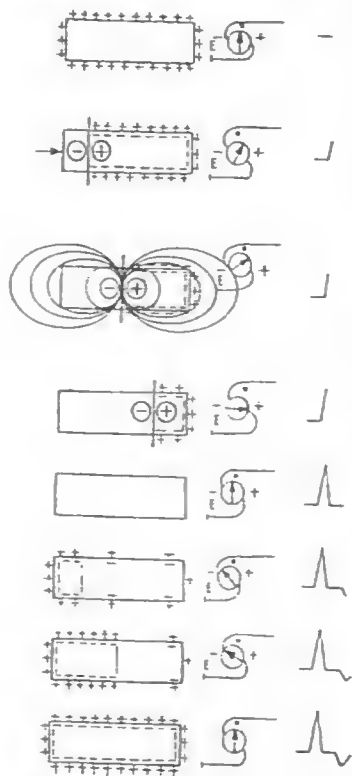


Fig. 6.35. Depolarizarea și repolarizarea unui fragment de miocard inclus într-un volum conductor. Electroful (E) este conectat la polul pozitiv al unui galvanometru. Deplasarea dipolului determină înregistrarea reprezentată.

Circuitul electric reprezentat de ansamblul inimă-organism, prin care se transmit fenomenele electrice cardiace la suprafața corpului, este extrem de complex. Această complexitate se datorează faptului că sarcinile generate se deplasează prin inimă într-un mod spațial și temporal intricat, conductibilitatea electrică a diverselor țesuturi este neuniformă, iar distanțele dintre electrozi și inimă sunt variabile. Einthoven (1913) a propus un circuit echivalent, simplificat, care să reprezinte această complexitate. Acest circuit, cunoscut sub denumirea de triunghiul Einthoven, a devenit baza teoriei derivațiilor, fiind utilizat și astăzi. Folosirea sa presupune câteva aproximări fizice și geometrice, cum ar fi:

1. rădăcina membrilor: superior drept și stâng și inferior stâng, constituie vârfurile unui triunghi echilateral;
2. activitatea electrică a inimii în orice moment poate fi reprezentată printr-un vector cu baza în centrul triunghiului;
3. inima și membrele se află în același plan frontal, care ar împărți corpul în două jumătăți egale;
4. conductibilitatea electrică a corpului este omogenă;
5. membrele comportându-se ca niște conductori liniari, plasarea electrozilor la rădăcina lor, sau oriunde pe lungimea liniară, nu aduce diferențe.

Uneori, în locul triunghiului Einthoven se folosește sistemul triaxial Bayley (1943), realizat prin translația laturilor triunghiului Einthoven în centrul acestuia. Sistemul triaxial este utilizat, de exemplu, pentru stabilirea axei electrice a inimii (vezi mai jos).

Proiecția vectorului momentan cardiac în derivațiile bipolare. ECG fiind înscriserea continuă a variațiilor vectorului cardiac global în fiecare moment, pe oricare dintre cele trei derivații se înregistrează o diferență de potențial ce corespunde ca amplitudine, direcție și sens proiecției vectorului momentan cardiac pe axa derivației respective (latura corespunzătoare a triunghiului Einthoven). Baza vectorului se proiectează pe centrul laturii, iar vârful vectorului se va proiecta coborând o perpendiculară pe latura respectivă. Mărimea diferenței de potențial înregistrate (mV) va fi egală cu lungimea proiecției de la bază la vârf, iar sensul înregistrării (pozitiv sau negativ) va fi determinat

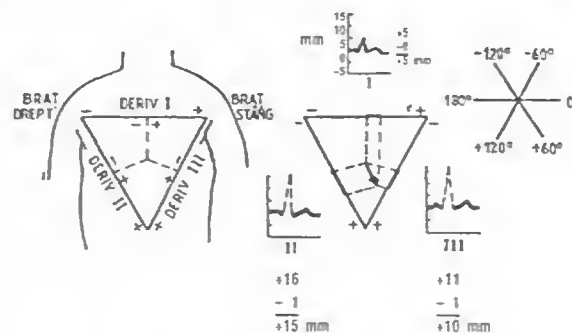
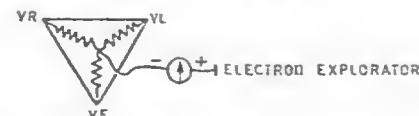


Fig. 6.36. Triunghiul Einthoven și proiecția vectorului cardiac principal pe axele derivațiilor. Sunt reprezentate complexe ECG înregistrate în cele trei derivații. Sumarea undelor pozitive și negative permite reconstituirea vectorului. Sistemul triaxial Bayley este reprezentat în dreapta.

de orientarea vârfului proiecției (spre electroful pozitiv explorator sau spre electroful de referință negativ). Aceași diferență de potențial, generatoare a unui vector momentan unic, va determina în cele trei derivații unde de aspect diferit, în funcție de proiecția pe axa derivațiilor respective. Înregistrările acestor unde pot servi, printr-un procedeu invers, la aflarea mărimei, sensului și direcției vectorului momentan care le-a generat.

2. Derivațiile unipolare ale membrilor sunt derivațiile în care electroful explorator (+) este plasat la nivelul vârfurilor triunghiului Einthoven. Există trei derivații unipolare ale membrilor, în care se măsoară diferența dintre potențialul membrilor: superior drept (VR), stâng (VL), inferior stâng (VF) și potențialul unui electroful de referință. Se pot utiliza două tipuri de electrozi de referință (indiferenți). Primul tip, denumit și borna centrală Wilson (1934), realizează un potențial de referință de valoare 0 (fig. 6.37. A, B, C) prin unirea celor trei extremități cu ajutorul unor rezistențe foarte mari (peste 100 Mhm). Conform legii

A. BORNA CENTRALĂ WILSON.



B. DERIVAȚIILE UNIPOLARE ALE MEMBRILOR (WILSON).



C. DERIVAȚIILE UNIPOLARE AUGMENTATE ALE MEMBRILOR (GOLDBERGER).



Fig. 6.37. Derivațiile unipolare ale membrilor.

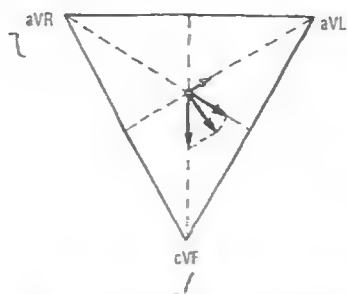


Fig. 6.38. Proiecția unui vector momentan cardiac pe axele derivațiilor unipolare ale membrilor.

a II-a a circuitelor (Kirchhoff), suma potențialelor absolute, înregistrate la nivelul celor trei extremități, va fi: $VR + VL + VF = 0$, rezistențele având rolul de a minimaliza diferențele dintre rezistențele celor trei electrozi aplicați pe tegument. Triunghiul Einthoven, fiind o reprezentare aproximativă a condițiilor reale, potențialul bornei centrale Wilson nu rămâne exact la valoarea 0, prezentând variații suficient de reduse pentru a putea fi neglijate.

Principalul dezavantaj al acestor trei derivații unipolare (VR, VL și VF), având ca electrod indiferent borna centrală Wilson, rămâne amplitudinea relativ mică a deflexiunilor înregistrate. În 1947, Goldberger a observat că potențialul de la nivelul unei extremități poate fi mărit (augmentat) prin simpla deconectare a membrului respectiv din borna centrală Wilson. Astfel, s-au introdus derivațiile unipolare augmentate ale membrilor (aVR, aVL, aVF), în care traseele au aceeași configurație, dar amplitudini de 1,5 ori mai mari. Aceste

derivații sunt introduse în toate electrocardiografele moderne. Relațiile algebrice dintre derivațiile unipolare simple și augmentate ale membrilor sunt prezentate mai jos:

$$VR + VL + VF = 0 \quad (1)$$

$$VR = -(VL + VF) \quad (2)$$

$$aVR = VR - 1/2 (VL + VF) \quad (3)$$

$$2aVR = 2VR - (VL + VF) \quad (4)$$

substituind din (2)

$$2aVR = 2VR + VR = 3VR \quad (5)$$

$$aVR = 3/2 Vr \quad (6)$$

Proiecția vectorului momentan cardiac în derivațiile unipolare ale membrilor. În cazul derivațiilor unipolare ale membrilor, axele de proiecție ale vectorului sunt reprezentate de bisectoarele unghiurilor corespunzătoare din triunghiul Einthoven. Baza vectorului se proiectează în centrul triunghiului (intersecția bisectoarelor), iar vârful se proiectează coborând o perpendiculară pe axa derivației respective (fig. 6.38). Amplitudinea potențialului este dată de mărimea proiecției vectorului pe axul derivației, iar sensul unde (+ sau -) este dat de orientarea vârfului proiecției. Unda este pozitivă dacă proiecția se orientează cu vârful spre latura opusă derivației în cauză și invers. Amplitudinea potențialului înregistrat de electrodul explorator (V_p = proiecția vectorului pe axa derivației) va fi egală cu produsul: $E \times \cos \theta$, în care E este amplitudinea vectorului cardiac și θ este unghiul dintre vector și axa derivației.

Relațiile algebrice care leagă amplitudinea proiectărilor în derivațiile unipolare cu cele din derivațiile bipolare, așa cum rezultă din geometria triunghiulară Einthoven, sunt prezentate mai jos:

$$I = (VL - VR) \times 2 = (aVL - aVR) \times 3$$

$$II = (VF - VR) \times 2 = (aVF - aVR) \times 3$$

$$III = (VF - VL) \times 2 = (aVF - aVL) \times 3$$

3. Derivațiile unipolare toracale permit înregistrarea variațiilor vectorilor cardiaci în plan orizontal și la distanțe relativ reduse de inimă. Pentru standardizarea acestor derivații, poziția electrozilor se exprimă într-un sistem de referință (grilă), format din linii verticale și orizontale, pe suprafața toracelui.

Linii verticale se notează cu cifre arabe și sunt următoarele: 1 - sternală dreaptă; 2 - sternală stângă; 3 - parasternală stângă (la 1/2 distanței între 2 și 4); 4 - medioclaviculară stângă (vârf); 5 - axilară stângă anterioară; 6 - axilară stângă; 7 - axilară posterioară stângă; 8 - scapulară (marginea internă și vârful omoplatului stâng); 9 - paravertebrală stângă. La aceste linii se mai adaugă 3r, 4r, 5r și 6r pe hemitoracele drept, într-o poziție simetrică cu cele corespunzătoare de pe hemitoracele stâng (fig. 6.39)

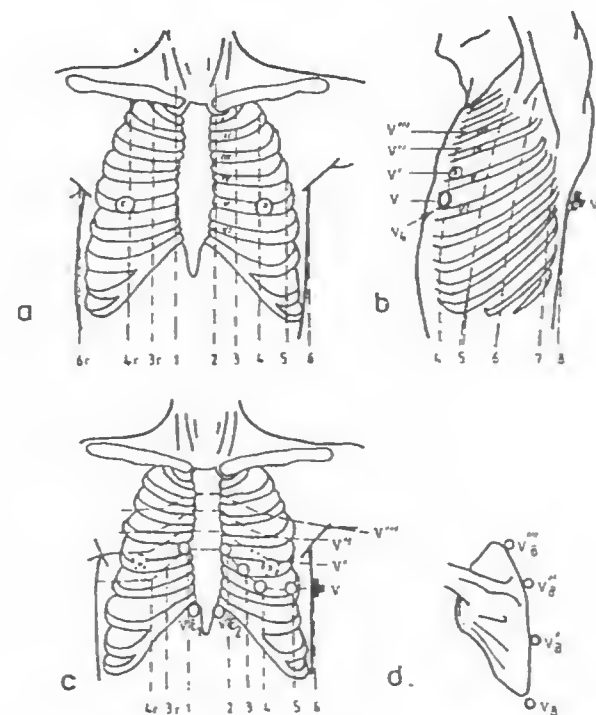


Fig. 6.39. Reprezentare schematică a sistemului de coordonate utilizat pentru obținerea derivațiilor toracice. Sistemul de linii verticale (a, b), orizontale (c), derivațiile scapulare (d).

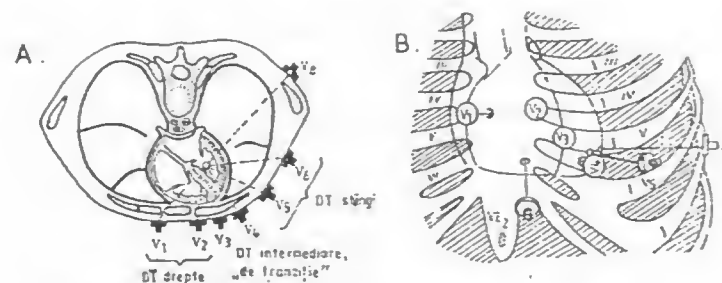


Fig. 6.40. Derivațiile precordiale. Reprezentarea axelor de înregistrare (A) și a proiecției electrozilor pe diferite segmente ale inimii (B). DT, derivații toracice.

Liniiile orizontale: linia V începe în spațiul IV intercostal pe liniile verticale 1 și 2 și se continuă în spațiul V intercostal pe liniile verticale 4-9. Liniile $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$, paralele cu V, sunt plasate cu 1, 2 și, respectiv, 3 spații mai sus. Sunt uneori notate cu X, Y și, respectiv, Z.

Puncte sternale: se adaugă sistemului de coordonate menționat, se notează cu VE_2, VE_1, VE , fiind situate la stânga, la dreapta și, respectiv, în centrul apendicelui xifoid.

În mod curent, în electrocardiograma clinică se utilizează derivațiile V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 și V_6 (derivații precordiale), situate la intersecția liniilor corespunzătoare din sistemul de referință. Aceste derivații explorează activitatea electrică a inimii într-un plan orizontal (fig. 6.40).

Centrul electric al inimii (originea comună a vectorilor cardiaci) este situat în ventriculul stâng, aproape de septul interventricular. Axa de proiecție a vectorilor, pentru fiecare derivație, va fi dreapta ce unește centrul electric al inimii cu derivația respectivă.

Proiecția vectorilor momentani cardiaci în derivațiile precordiale se realizează după aceleași reguli ca în cazul derivațiilor unipolare ale membrelor. Unda înregistrată va fi pozitivă dacă proiecția se dirijează cu vârful spre electrodul explorator. Datorită distanței relativ reduse față de inimă, fiecare electrod va explora predominant porțiunea de miocard cea mai apropiată (V_1-V_3 : partea mijlocie a peretelui anterior al ventriculului drept, fața dreaptă a septului interventricular; V_3 : marginea anterioară a septului interventricular; V_4 : vârful inimii; V_5-V_6 : peretele lateral al ventriculului stâng, lateral și inferior; V_7-V_9 : peretele lateral și posterior al ventriculului stâng).

4. **Alte derivații ECG:** pentru explorarea aprofundată a unor zone miocardice mai puțin accesibile, se utilizează derivațiile unipolare speciale, cum ar fi cele esofagiene, bronșice etc.

În cazul derivațiilor esofagiene (E), electrodul unipolar este inserat într-un cateter și introdus în esofag până în dreptul zonei cardiace explorate. Derivațiile poartă denumirea distanței existente între nivelul dinților și vârful electrodului explorator.

Derivația E_{35} , de exemplu, prezintă electrodul de culegere de pe fața posterioară a cordului la 35 cm de nivelul danturii.

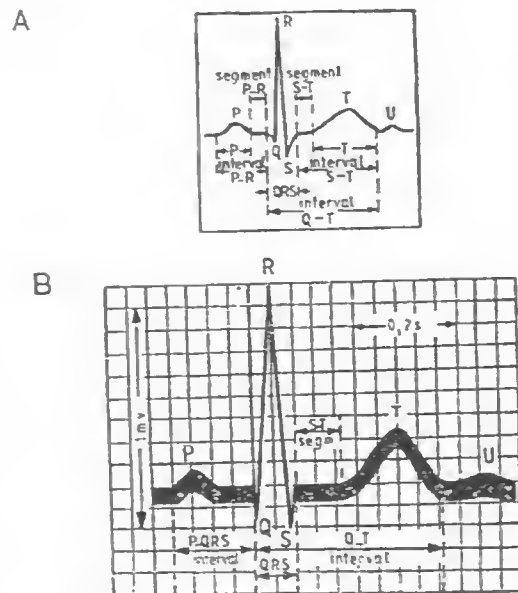


Fig. 6.41. ECG normală.

6.5.2. ELECTROGENEZA ȘI MORFOLOGIA UNDELOR ECG

În general, traseul ECG este format din unde, segmente și intervale, a căror morfologie variază în funcție de derivație (fig. 6.41).

Unde. Pe ECG apar 5 deflexiuni pozitive sau negative ce se succedă în cursul unei revoluții cardiace. Unda P reprezintă sistola electrică atrială și este urmată de o succesiune de patru unde (Q, R, S și T) ce reprezintă sistola electrică ventriculară, cu fazele de depolarizare (complexul QRS) și de repolarizare (unda T).

Segmente. Sunt porțiuni de traseu cuprinse între două unde succesive. Segmentul P-Q (P-R) reprezintă timpul de conducere atrio-ventriculară, segmentul S-T izoelectric corespunde fazei de eiecție ventriculară, iar segmentul T-P corespunde diastolei electrice generale a inimii.

Intervale. Reprezintă durata (distanța) dintre două puncte succesive ale traseului ECG. Intervalul conține de obicei un segment și 1-2 unde. Intervalul P-Q, cuprins între începutul unde P și începutul complexului QRS, reprezintă timpul de conducere sino-ventricular; intervalul Q-T, cuprins între începutul complexului QRS și sfârșitul unde T, reprezintă sistola ventriculară electrică; intervalul P-J, în care J este punctul de joncțiune al complexului QRS cu segmentul S-T, reprezintă depolarizarea din nodulul sinusal, până la momentul depolarizării totale ventriculare; intervalele P-P sau R-P reprezintă durata revoluției cardiace și sunt utilizate pentru determinarea frecvenței cardiace pe ECG.

Unda P reprezintă proiecția în derivația respectivă a vectorului de depolarizare atrială, rezultat din sumarea a doi vectori parțiali: unul precoce (depolarizarea atriului drept) și al doilea ceva mai tardiv (depolarizarea atriului stâng). Vectorul rezultat este paralel cu axul electric al inimii (orientat în jos, spre stânga și ușor spre înainte) și are amplitudinea redusă, mușchiul atrial fiind subțire.

Durata unde P este de 0,10-0,11 s (cu limita extremă inferioară de 0,08 s). Forma unde este rotunjită și uneori poate prezenta o ancoșă, dacă asincronismul celor doi vectori parțiali este mai accentuat. Amplitudinea unde variază între 0,10 și 0,30 mV.

Unda P este pozitivă în derivațiile standard (D I, D II, D III), este pozitivă și mică în aVL și aVF, negativă în aVR, pozitivă în V_1-V_2 și mai mare decât în V_3-V_4 .

Segmentul P-Q este de obicei izoelectric în toate derivațiile și reprezintă momentul repolarizării atriale, care se manifestă uneori cu o deflexiune negativă Ta (mai ales atunci când segmentul este alungit). Durata segmentului este de aproximativ 0,10 s (timp de conducere atrio-ventriculară).

Intervalul P-Q este format în proporție de 50-60% din unda P și are o durată totală de 0,12-0,20 s (timp cumulat de conducere atrială și A-V). Corespunde manifestărilor electrice auriculare (electroauriculogramă).

Complexul QRS: fiind un ansamblu de unde negative și pozitive generate de depolarizarea ventriculară, este denumit și complexul de activare (depolarizare) ventriculară. Dacă prima undă a complexului este negativă, ea va fi denumită unda Q. Prima undă pozitivă se numește R, iar prima undă negativă care îi urmează se va denumi S. Următoarele unde pozitive și negative ale complexului vor fi denumite R', r'' etc. și, respectiv, S', s''. Dacă undele au amplitudine mare, ele se numesc cu litere mari (Q, R, S), iar dacă amplitudinea lor este redusă, cu litere mici (q, r, s). Utilizând aceste reguli de nomenclatură, complexul de activare poate fi ușor descris din punct de vedere morfologic. Trebuie însă de pe acum menționat faptul că undele astfel denumite nu au o semnificație individuală directă. Reprezentând momente diferite în evoluția vectorului cardiac momentan, aspectul acestor deflexiuni va depinde de proiecția vectorului în axa derivației considerate. De la o derivație la alta, proiecția acestui vector poate fi pozitivă, negativă, amplă, redusă sau chiar nulă, generând unde cu denumirea diferită, dar cu aceeași semnificație.

Progresiunea unde de depolarizare prin ventricul determină un vector electric al cărui sens, direcție și amplitudine variază continuu, reprezentând sumarea instantanee și spațială a dipolilor locali. În evoluția acestui vector se descriu cinci momente succesive, reprezentate fiecare printr-un vector instantaneu (fig. 6.42).

Vectorul 1 reprezintă depolarizarea asimetrică a septului interventricular, la începutul activării ventriculare, care cuprinde fața stângă a septului, progresând spre dreapta. În plan frontal se proiectează oblic de la stânga spre dreapta și de sus în jos, iar în plan orizontal de la stânga spre dreapta și dinapoi înainte.

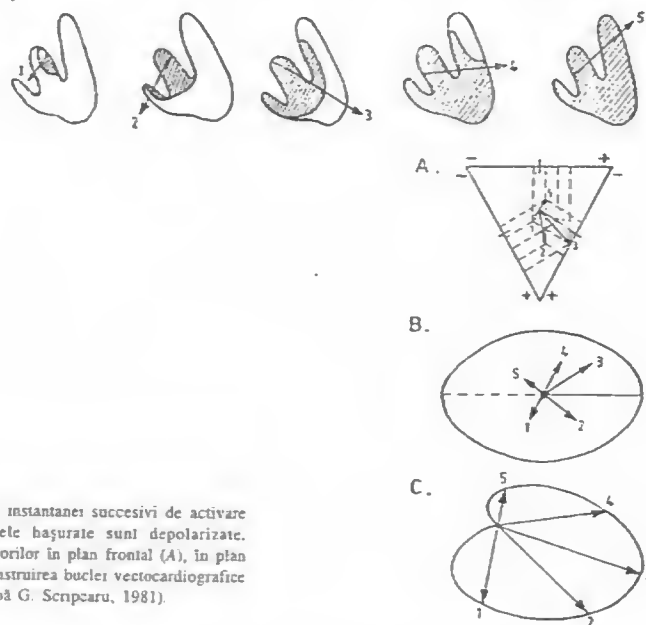


Fig. 6.42. Vectorii instantanei succesivi de activare ventriculară. Zonele hașurate sunt depolarizate. Reprezentarea vectorilor în plan frontal (A), în plan orizontal (B) și construirea buclei vectocardiografice (C) (după G. Scripcaru, 1981).

Vectorul 2 reprezintă depolarizarea zonei endocardice a ventriculului drept. Vectorul se proiectează în plan frontal oblic de la stânga la dreapta și de sus în jos, iar în plan orizontal ușor oblic spre stânga și spre înainte.

Vectorul 3 corespunde momentului depolarizării feței endocardice a ventriculului stâng și a regiunii vârfului. Este orientat în plan frontal de la dreapta la stânga și de sus în jos, iar în plan orizontal spre stânga și înapoi.

Vectorul 4 este generat de depolarizarea peretelui ventricular stâng (transversal, dinspre endocard spre epicard). În plan frontal este dirijat aproape orizontal spre stânga, iar în plan orizontal spre stânga și înapoi.

Vectorul 5 este expresia depolarizării ventriculare terminale ce cuprinde porțiunea postero-bazală a ventriculului stâng, porțiunea bazală a septului interventricular și conul arterei pulmonare. Vectorul rezultat este orientat în sus și ușor spre stânga în plan frontal, iar în plan orizontal spre înapoi și ușor spre dreapta.

6.5.2.1. Proiecția vectorilor complexului de activare ventriculară în diferite derivații

Derivațiile bipolare standard. În derivația I, aspectul complexului este de obicei qRs, corespondența vectorială fiind următoarea: q = vectorul 1; R = vectorii 2, 3, 4; s = vectorul 5 = 0. În derivațiile II și III complexul este de obicei în forma Rs, în care R = vectorii 1-4, iar s = vectorul 5. Analizând aceste date (fig. 6.43), se poate afirma că în derivațiile standard, în general, unda Q (când apare) este determinată de depolarizarea asimetrică a septului interventricular, unda R corespunde depolarizării ventriculare și mai ales a vârfului, iar unda S reprezintă sfârșitul depolarizării ventriculare (mai ales a bazei).

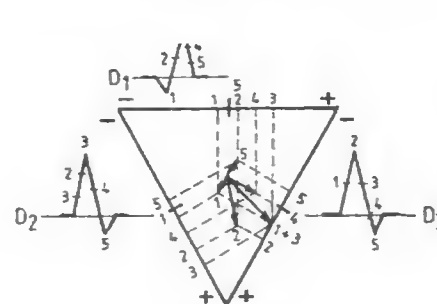


Fig. 6.43. Proiecția vectorilor succesivi de depolarizare ventriculară pe derivațiile bipolare ale membrilor (după G. Scripcaru, 1981).

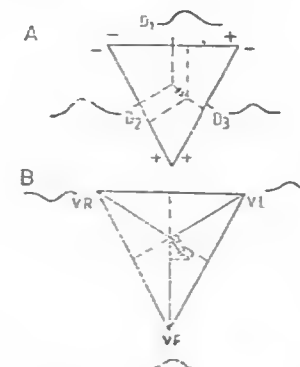


Fig. 6.44. Proiecția vectorului de repolarizare ventriculară pe derivațiile bipolare (A) și unipolare ale membrilor.

Derivațiile unipolare ale membrilor. În aVR aspectul morfologic general este cel al unei ECG inversate: undele P și T sunt negative, iar complexul de activare are forma rSr', în care r corespunde vectorilor 1 și 2, S corespunde vectorilor 3, 4, iar r' vectorului 5. În aVL complexul are forma qR (q = vectorii 1, 2; R = vectorii 3, 4, 5), iar în aVF - forma Rs (R = vectorii 1-4; s = vectorul 5).

Derivațiile precordiale. Culeg proiecțiile vectorilor menționați în planul orizontal și în axa derivației respective. Aspectul complexului variază de la V_1 spre V_6 . Unda R, de amplitudine redusă (r) în V_1 , crește treptat spre V_6 (R), iar unda S, de amplitudine maximă în V_1 (S), scade spre V_6 (s). În derivațiile precordiale drepte (V_1 - V_6), raportul de amplitudine R/S poate atinge valoarea din V_1 , iar în derivațiile stângi (V_5 - V_6) același raport se inversează, putând atinge valori de 8/1.

În general, ansamblul de unde QRS ce alcătuiește complexul de activare ventriculară are o durată de 0,06-0,10 s (activare rapidă). Amplitudinea sa este de 1-1,5 mV în planul frontal al derivațiilor I-III și aV și de până la 2 mV în derivațiile precordiale.

Segmentul S-T, delimitat între sfârșitul undei S și începutul undei T, coincide în timp cu platoul potențialului de acțiune de pe înregistrările simultane cu microelectrozi intracelulari. În această perioadă, mușchiul ventricular, total depolarizat la sfârșitul complexului de depolarizare, realizează ejecția sângelui și începe să se repolarizeze lent. Datorită echilibrului depolarizare-repolarizare, diferențele de potențial se anulează, vectorul de moment este de valoare 0, segmentul S-T fiind izoelectric. Orice denivelare ce depășește 0,1 mV (1 mm în condiții uzuale de amplificare) este considerată patologică.

Unda T corespunde repolarizării ventriculare rapide. Cum în fibrele profunde ale miocardului ventricular (subendocardice) depolarizarea este prelungită față de cele superficiale (subepicardice), repolarizarea va începe în zona subepicardică (care s-a depolarizat ultima) și va progresa spre endocard. Această particularitate a miocardului ventricular (repolarizare cu traiect inversat față de mușchiul atrial și cel scheletic) face ca vectorul electric de repolarizare ventriculară să aibă același sens cu vectorul principal de depolarizare (vectorul 3) al complexului QRS (în jos, spre stânga și înapoi). Întârzierea repolarizării în fibrele subendocardice se explică prin particularitățile membranare ale acestora (constantă de timp diferită a fluxurilor ionice), precum și prin faptul că sunt expuse la stimuli extrinseci suplimentari (presiunea și vâscozitatea sângelui, gradienti termici etc.) (fig. 6.44 A, B).

Fiind proiecția vectorului cu orientarea menționată, unda T este pozitivă în derivațiile standard, aVL și aVF și precordiale. Are o formă rotunjită, asimetrică, cu ramul ascendent prelungit față de cel descendent. Durata undei este de 0,15-0,10 s. Amplitudinea este de 0,2-0,6 mV în derivațiile standard (I-III), unipolare ale membrilor (aV) și precordiale stângi, dar ajunge până la 1 mV în derivațiile precordiale drepte.

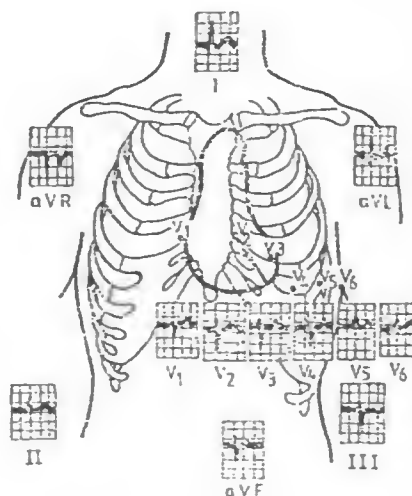


Fig. 6.45. ECG normală în diferite derivații.

Intervalul Q-T reprezintă sistola ventriculară electrică (electroventriculogramă). Durata sa variază în funcție de frecvența cardiacă. La un puls de 70 bătăi/min, durata Q-T este de 0,33–0,42 s, iar la 90 bătăi/min scade la 0,29–0,37 s. La aceeași frecvență, durata este mai mare la femei decât la bărbați. La o schimbare bruscă a frecvenței cardiace (*pacing*), durata intervalului se modifică la normali abia după minimum 10 revoluții cardiace. Cum această durată este un parametru important în explorarea funcției cardiace, determinarea valorii normale pentru subiectul în cauză are o importanță deosebită. Această determinare se poate calcula fie prin formula de calcul [de exemplu, formula Hegglin, în care $(Q-T) = 0,39 \times (R-R) \pm 0,04$ s], fie din tabele.

Unda U este o undă pozitivă ce apare înconștient după unda T. Are o amplitudine în general mică, cu un maximum de 0,15 mV în V_2 – V_3 . Durata undei este de 0,15 – 0,22 s. Este datorată unui fenomen de repolarizare tardivă a miocardului ventricular și este mai evidentă la sportivi și persoane cu hipertensiune arterială. Potențialele ventriculare tardive pot fi definite ca o activitate electrică anormală de înaltă frecvență și de mică amplitudine (1 – 40 μ V), ce apare în porțiunea terminală a complexului QRS proiectându-se mai aproape sau mai departe pe parcursul segmentului ST al unei ECG în ritm sinusal.

ECG normală în diferite derivații este prezentată în fig. 6.45.

6.5.2.2. Axa electrică a inimii

Axa electrică este vectorul principal rezultat din însumarea vectorilor parțiali multipli ce se succedă într-un ciclu cardiac. Orientarea sa în plan frontal dă informații importante cu privire la starea morfo-funcțională a elementelor miocardice care participă la depolarizare și repolarizare. Pentru a afla axa electrică a inimii este suficientă, de regulă, determinarea axei QRS. Aceasta se poate realiza în trei moduri, folosind metoda triunghiului echilateral Einthoven, sistemul triaxial al lui Bayley sau sistemul hexaxial al lui Pallaes-Cabrera. Determinarea axei electrice a inimii în funcție de sensul și amplitudinea QRS în derivațiile bipolare este ilustrată în figura 6.46.

Ca sistem de referință pentru calculul și proiecția axei electrice se utilizează un sistem hexaxial, care combină sistemul triaxial Bayley pentru derivațiile bipolare cu cele trei axe de proiecție ale derivațiilor aVR, aVL și aVF.

Se calculează de obicei trei axe electrice: AP – rezultând din depolarizarea atrială; AT – rezultând din repolarizarea ventriculară și, cel mai frecvent, AQRS – rezultând din depolarizarea ventriculară. Amplitudinea undelor succesive se adună algebric pentru fiecare derivație și rezultatul se reprezintă pe axa derivației respective. Reprezentările de pe două derivații se sumează geometric, rezultanta reprezentând axa electrică a cărei orientare se exprimă în grade (fig. 6.47). Se consideră normale axele electrice cuprinse în cadranul 0° – $+80^\circ$ al sistemului hexaxial, între $+45^\circ$ și $+60^\circ$. Axele electrice orientate între 0° și -30° sunt orizontalizate (deviate spre stânga), iar cele între $+80^\circ$ și $+110^\circ$ sunt verticalizate (deviate spre dreapta). Paralelă cu axa anatomică a inimii, axa electrică apare deviată la stânga în cazul obezilor și spre dreapta la longilini.

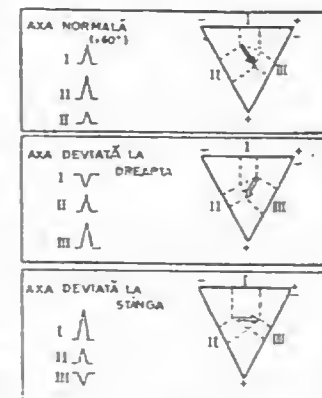


Fig. 6.46. Derivațiile axei electrice ale inimii.

6.5.2.3. Variații fiziologice ale ECG

Traseul ECG nu este identic la normali. El prezintă nenumărate variații posibile ce țin de modul de activare cardiacă, de morfologia subiectului, de poziția inimii în torace. Se descriu astfel:

a) rotații în jurul axului antero-posterior, ce se află în devieri ale axului electric cardiac spre stânga (orizontalizat: sarcină, obezitate, hipertrofie ventriculară stângă la sportivi) sau spre dreapta (verticalizat: cordul „în picătură” la longilini) (fig. 6.48);

b) rotații în jurul axului longitudinal, ce pot fi rotații orare (S profund în D I, Q profund în D III și deplasarea zonei de tranziție spre stânga, în derivațiile precordiale) și rotații anteroare (Q profund în D I, cu S profund în D III și deplasarea zonei de tranziție spre dreapta, în derivațiile precordiale);

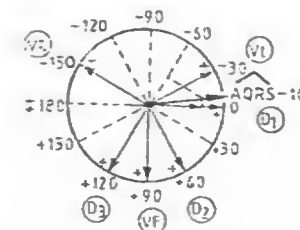


Fig. 6.47. Calculul AQRS plecând de la două derivații standard (D_1 și D_3) și utilizând sistemul hexaxial. Axa calculată din valorile arbitrare prezentate are o valoare de -10° (pentru fiecare axă de derivație, linia continuă corespunde valorilor pozitive, iar cea punctată – valorilor negative).

$$\begin{array}{cc}
 \begin{array}{c} \text{D}_1 \\ +40 \end{array} & \begin{array}{c} \text{D}_3 \\ +10 - 35 = -25 \end{array}
 \end{array}$$

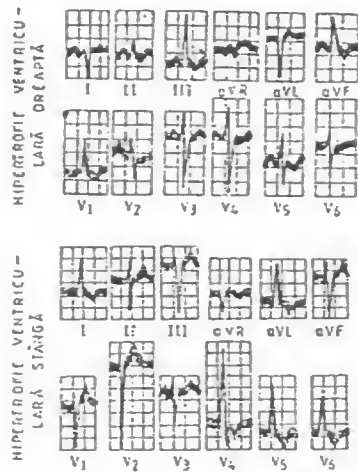


Fig. 6.48. ECG în hipertrofia ventriculară.

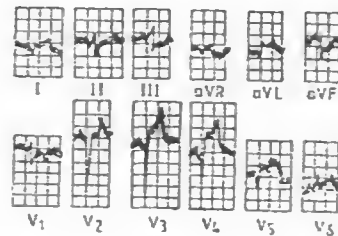


Fig. 6.49. ECG în infarctul miocardic anterior acut (după Brobeck, 1984).

c) rotații în jurul axului transversal cu bascularea vârfului spre înainte (în care apar unde Q profunde în D I, II și III) și cu bascularea vârfului spre înapoi (cu unde S profunde în D I, II, III).

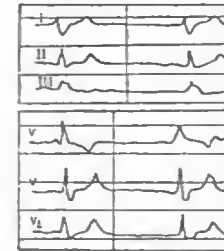
Modificări fiziologice apar și pe ECG al nou-născuților (tahicardie sinusală de 120-140/min, preponderență ventriculară dreaptă, cu devierea axului electric spre dreapta la $+100^\circ$, rotație orară și unde T negative în precordialele drepte). În afară de vârstă, există variații fiziologice ale ECG legate de sex, rasă, constituție individuală, factori geografici. Acestea au dus la stabilirea unor valori cantitative ale măsurătorilor electrocardiografice considerate normale și în funcție de care trebuie considerate valorile patologice. Electrocardiologia cantitativă este cu atât mai necesară, cu cât electrocardiografele moderne posedă programe diagnostice prestabilite, bazate pe valorile considerate normale.

6.5.2.4. Modificări patologice ale ECG

Faptul că, practic, nu există manifestare patologică la nivel cardiac fără răsunet electrocardiografic a făcut din această metodă cel mai sigur și cel mai utilizat mijloc paraclinic de investigare cardiologică. Cum analiza ECG patologice își are locul în tratatele de specialitate, în cele de față ne vom limita doar la o discuție cu caracter exemplificativ.

Tulburări de irigație coronariană. Reducerea irigației într-un teritoriu din miocard determină, în funcție de gradul ocuziei și duratei, tulburări inițiale de ischemie, urmate de leziunea fibrelor miocardice, și, în final, de necroza țesutului cardiac (fig. 6.49); în cazul ventriculului, ischemia, determinând creșterea permeabilității membranelor a fibrelor interesate, duce la o prelungire a duratei depolarizării subepicardice. Din acest motiv, sensul vectorului de repolarizare este inversat și apare o undă T negativă. Leziunea fibrelor, determinând o depolarizare permanentă a acestora, duce la apariția unei diferențe de potențial permanente, de repaus, între zona lezată și zonele de miocard normal. În aceste condiții apare așa-zisul „curent de leziune”, linia de bază a ECG fiind deplasată sub nivelul normal. După ce depolarizarea a cuprins și zona lezată, repolarizarea se va face inițial doar până la nivelul normal, dând aspectul supradenivelat segmentului S-T.

A. BLOC DE RAMURĂ DREAPTĂ



B. BLOC DE RAMURĂ STÂNGĂ



C. BLOC TOTAL A-V

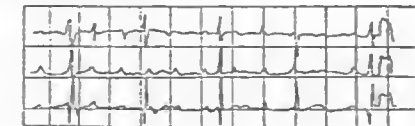


Fig. 6.50. Tulburările de conducere (după G. Scripcaru 1981).

Abia după acest moment, potențialul revine la valorile subnormale, determinate de curentul de leziune. În cazul în care zona lezată nu se poate depolariza complet, atunci supradenivelarea S-T este atât de accentuată încât continuă în platou unda R (unda Pardee). În necroză, țesutul miocardic interesat devine inert din punct de vedere electric și conduce pasiv spre suprafață (infarct transmural) un complex QRS total inversat (așa cum apare în zona endocardică). În infarctul acut trei zone coexistă. Necroza centrală este înconjurată de o zonă de leziune, care la rândul său este circumscrișă de ischemie. În aceste condiții, particularități ECG ale fiecărei zone pot fi observate doar cu electrozi epicardici. În derivațiile distantate, aspectul înregistrat va include toate tulburările: undă Q profundă și largă, supradenivelarea segmentului S-T și T negativă. Manifestarea necrozei (Q profund) poate să nu apară când zona este redusă, inclusă complet în țesut sănătos sau doar epicardică. Localizarea infarctului se poate realiza în funcție de derivația în care tulburările menționate apar cel mai evident.

Tulburări de conducere. Blocul de ramură al fasciculului His, deși nu alterează ritmul cardiac, modifică cursul normal al depolarizării ventriculare, alterând semnificativ aspectul complexului de activare.

Blocul de ramură dreaptă face ca depolarizarea ventriculului drept să aibă loc după depolarizarea totală a ventriculului stâng. Apare astfel un vector tardiv, dirijat anterior și spre dreapta. Complexul de activare se lărgeste semnificativ. În D III apare o undă Q-S amplă, în aVR și V₁ apare un R tardiv, lărgit și oscilant, iar în V₅-V₆ și aVL apare o undă S tardivă și oscilantă.

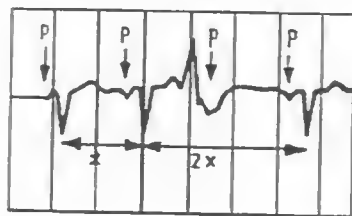


Fig. 6.51. Extrasistolă ventriculară cu repaus compensator.

Blocul de ramură stângă întârzie depolarizarea feței stângi a septului și a ventriculului stâng. Unda Q dispare în D I, V₁, V₆. Vectorul lent și tardiv, dirijat spre stânga, determină unde R largi și oscilante în V₅-V₆. În general, undele S-S și T sunt orientate în sens invers față de QRS (fig. 6.50).

Blocul atrio-ventricular poate fi: incomplet (întârziere A-V cu intervalul P-R mai mare de 0,2 s); parțial (întreruperi temporare ale conducerii atrio-ventriculare, când apar unde P neurmă de complexe ventriculare); complet (disociere completă, cu ritmuri diferite ale undei P și ale complexului ventricular).

Tulburări de ritm. Cum trecerea în revistă a tulburărilor de ritm nu este posibilă, în cele de față vor fi menționate doar câteva aspecte ilustrative.

Aritmiile sinusale sunt variații ale frecvenței sinusale, legate cel mai frecvent de variațiile de tonus vagal, sincrone cu respirația. Frecvența crește în inspir și scade în expir. Ciclurile ECG normale se succedă, la distanțe progresiv crescute sau scăzute, în funcție de respirație.

Aritmiile prin stimuli ectopici atriali apar datorită prezenței unui focar de excitație extrasinusal cu frecvență crescută. Tulburarea poate apărea paroxistic, iar unda P este modificată în numeroase cazuri.

Flutterul atrial: când *pace-maker*-ul ectopic are o frecvență foarte mare, apar unde de tip P regulate ca formă și ritm (220-370/min). Ventriculul poate răspunde regulat la frecvențe mai joase (bloc atrio-ventricular 2/1 sau 3/1).

Fibrilația atrială: fibrele atriale se descarcă și se contractă defazat și neregulat. Unda P dispare, ritmul ventricular este neregulat.

Sistolele ventriculare ectopice: extrasistole în care depolarizarea ventriculară, determinată de un focar ectopic ventricular, duce la modificări ale configurației complexului QRST și alungirea intervalelor QRS și QT disociate de unda P (fig. 6.51).

Fibrilația ventriculară: activitatea ventriculară devenită haotică și disociată este lipsită de eficiență mecanică, iar pe ECG dispar complexe regulate QRST. Are consecințe letale rapide, dar se poate combate prin defibrilare medicamentoasă și mai ales prin șoc electric cu electrozi transcutanați. Până în momentul defibrilării, viața subiectului nu poate fi menținută decât prin masaj cardiac sau circulație extracorporală (pompă).

6.5.3. VECTOCARDIOGRAFIA ȘI ELECTROCARDIOGRAFIA ENDOCAVITARĂ

Interpretarea ECG prin prisma câtorva vectori momentani reprezentativi nu trebuie să facă pe cel ce o practic să uite că, de fapt, vectorul cardiac este un continuum variabil ca sens, direcție și mărime. Această variație poate fi reprezentată unind vârfurile vectorilor cardiaci succesivi (calculați și reprezentați la scară), în centrul triunghiului Einthoven, în funcție de valorile proiecțiilor succesive pe derivațiile frontale. O astfel de reprezentare a fost realizată pentru prima oară de Mann (1920) sub denumirea de monocardiogramă. Odată cu introducerea osciloscopului cu tub catodic, astfel de operații și reprezentări au putut fi realizate electronic, direct pe ecranul osciloscopului, conectând diversele derivații la plăcile orizontale și verticale ce dirijează fasciculul de electroni. Metoda a fost denumită *vectocardiografie* și a fost realizată în cele trei planuri (frontal, orizontal și sagital), utilizând dintre derivațiile ECG descrise pe cele mai potrivite sau, în unele variante, derivații ortogonale, perpendiculare între ele (derivația orizontală trans-toracică X, derivația verticală cap-picior Y, derivația sagitală stern-esofag Z). Vectocardiograma astfel obținută constă din trei bucle, ce se intersectează în același punct O și reprezintă evoluția în timp a vectorului undei P, complexului QRS și a undei T (fig. 6.52).

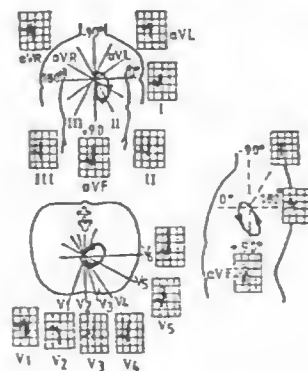


Fig. 6.52. Vectocardiograma (buclele P și QRS) și derivațiile corespunzătoare.

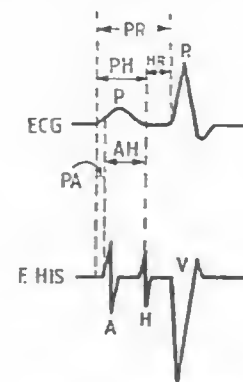


Fig. 6.53. Potențialul histan raportat la ECG.

Deși utilă, vectocardiografia este mult mai puțin folosită în practică decât ECG, mai ales datorită dificultății de a stabili incidența în timp a modificărilor.

Electrocardiografia endocavitară. Este posibilă cu ajutorul electrozilor bipolari, introduși prin cateterism, și se utilizează relativ frecvent, mai ales în blocuri atrio-ventriculare, în înregistrarea activității electrice a fasciculului His, a nodulului A-V și a rețelei Purkinje, concomitent cu ECG, în câteva derivații. Electrograma de fascicul His (EFH) este formată în succesiune de: (1) unda A (depolarizarea nodulului A-V); (2) unda rapidă H (transmiterea prin fasciculul His); (3) unda V (depolarizarea ventriculară) (fig. 6.53). Pe EFH s-au descris trei intervale succesive: (1) intervalul PA, de la începutul undei P pe ECG, până la unda A pe EFH (timp de conducere de la nodulul sinusal la nodulul A-V = 27 ms); (2) intervalul AH (timp de conducere nodal A-V = 92 ms) și (3) intervalul HV (timp de conducere His = 41 ms). În funcție de alungirea unuia dintre aceste trei intervale, blocurile atrio-ventriculare pot fi suprahisiene (intranodale), intrahisiene sau infrahisiene.

Monitorizarea și înregistrarea continuă a ECG se poate realiza atât în serviciile de reanimare corespunzător dotate, cât și ambulator, cu ajutorul unui mic magnetofon portabil tip Holter. Pot fi obținute astfel înregistrări de lungă durată în vederea preluării sau transmiterii telefonice a eventualelor alterări electrocardiografice.

6.6. REGLAREA NEURO-UMORALĂ A ACTIVITĂȚII CARDIACE

Adaptarea activității cardio-vasculare la nevoile organismului este una dintre condițiile fundamentale ale supraviețuirii și activității normale.

În permanență, forța și frecvența contracției cardiace sunt ajustate, în vederea menținerii unui debit cardiac adecvat. Reglarea debitului cardiac se efectuează prin mecanisme intrinseci (de autoreglare) sau extrinseci (neuro-reflexe și umorale).

6.6.1. MECANISME INTRINSECI

Reglarea intrinsecă a activității cardiace este mecanismul bazic ce asigură adaptarea cordului la încărcarea impusă, în absența oricăror influențe nervoase și umorale din afară. Mecanismele intrinseci pot

fi heterometrice sau homeometrice, după cum modificările debitului cardiac sunt determinate de alungirea fibrelor cardiace (legea inimii) sau respectiv de alți factori (frecvență și temperatură).

Mecanisme intrinseci heterometrice (legea fundamentală a inimii, legea Franck-Starling). Creșterea lungimii fibrelor miocardice (umplerea telediastolică) determină creșterea forței de contracție și debitul cardiac (vezi și mai sus). Un alt efect, mai puțin bine explicat, al creșterii umplerii diastolice, este accelerarea corelată a frecvenței sinusale. Se presupune că întinderea peretelui atrial, ca urmare a aflului crescut de sânge, acționează ca un factor de stimulare asupra nodulului sinusal, accelerând frecvența de descărcare.

Mecanisme intrinseci homeometrice. La aceeași lungime inițială a fibrelor, frecvența cardiacă și temperatura influențează forța de contracție. În limitele frecvențelor fiziologice, creșterea frecvenței cardiace determină creșterea corelată a forței de contracție. Fenomenul descris de Bowditch în 1871 (fenomenul în scară – vezi mai sus) pe inima de broască a fost confirmat și aprofundat ulterior pe inima de mamifer. Relația are mai multe aspecte. Dacă în cursul activității cardiace apare o bătaie prematură (extrasistola), forța acestei contracții este redusă. Acest efect inotrop negativ, al reducerii intervalului, este de foarte scurtă durată, fiind probabil legat de procesul de relaxare și repolarizare membranară. Micșorarea intervalului dintre sistole (creșterea frecvenței cardiace) are și efecte inotrope pozitive, de lungă durată. Contracțiile normale, ce urmează unei extrasistole, sunt mult mai ample, iar creșterile de durată ale frecvenței măresc forța sistolică. Fenomenul se explică prin acumularea de Ca^{2+} de la o sistolă la următoarea. Trebuie menționat, totuși, că, în condiții fiziologice, creșterea frecvenței nu determină creșteri liniare ale debitului cardiac. Cum durata umplerii diastolice scade și volumul telediastolic este redus, fracția de ejeție este ceva mai scăzută în tahicardiile imortante. Ca urmare, debitul sistolic se reduce. Efectul inotrop pozitiv al frecvenței crescute are probabil rolul de a compensa parțial scăderile de debit sistolic (menținându-l mai aproape de normal), în tahicardiile accentuate. Hipotermia crește forța de contracție pe preparate izolate. Pe cordul *in situ*, bipotermia (sub $26^{\circ}C$) și pirexia (peste $43^{\circ}C$) reduc forța de contracție.

6.6.2. MECANISME EXTRINSECI NEURO-REFLEXE

Reglarea neuro-reflexă a activității cardiace este în mod firesc sinergică cu cea a activității vasculare. Sistemul circulator cardio-vascular reacționează ca un tot unitar la diverse solicitări din mediul extern și intern, numeroase mecanisme de reglare reflexă afectând simultan atât cordul, cât și venele. În cadrul acestor mecanisme, o serie de verigi morfo-funcționale sunt comune pentru întregul sistem.

- zonele receptoare (reflexogene) la nivelul cărora, prin intermediul baro- și chemoreceptorilor, se aplică solicitarea ce pune în mișcare mecanismul;
- căile nervoase aferente, ce transportă stimulii la centrul de control din SNC;
- centri cardio-vasculari, a căror organizare asigură ajustarea simultană a impulsurilor către cord și către vase, în funcție de nevoile organismului;
- căi eferente simpatico-parasimpatice. Călea nervoasă eferentă este cea care deosebește cele două componente ale sistemului circulator, dictând modul specific de reacție în cadrul unor mecanisme comune de activare reflexă. Aceste mecanisme fiind discutate într-un capitol ulterior, cele ce urmează se vor referi exclusiv la componenta eferentă vegetativă, cu destinația cardiacă (fig. 6.54). Efectele asupra inimii sunt realizate prin intermediul receptorilor membranari constituiți din structuri proteice care interacționează cu proteinele G. Activarea acestora duce la modificarea activității unor canale ionice (Ca^{2+} , K^{+}) sau unor enzime (adenilat ciclaza, fosfolipaza C).

Adenilat ciclaza este activată de proteinele Gs cuplate cu receptori β -adrenergici și este inhibată de proteinele Gi cuplate cu receptori colinergici muscarinici (M_2), adenozinici (A_2) sau opioizi. Ea catalizează formarea cAMP, mediatorul secund care activează la rândul său protein kinaza A, ducând la fosforilarea a numeroase proteine intracelulare care formează canale, pompe sau enzime.

Fosfolipaza C este activată de proteinele Gq cuplate cu receptori α -adrenergici, receptori pentru angiotensina II, endoteline. Ea duce la generarea de inozitol trifosfat și diacilglicerol, care au un rol important în activitatea celulară.

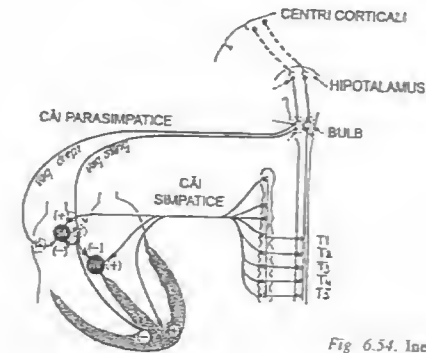


Fig. 6.54. Inervația simpatico-parasimpatică a inimii.

Inozitol trifosfatul acționează asupra reticulului sarcoplasmatic, ducând la eliberarea Ca^{2+} care influențează contracția inimii prin intermediul troponinei C și a calmodulinei.

Diacilglicerolul activează protein kinaza C, care acționează prin fosforilarea unor proteine celulare.

Inervația simpatică a inimii. Își are originea în neuronii preganglionari din coarnele laterale ale măduvei cervico-dorsale (coloana intermedio-laterală). Acești neuroni primesc eferența reglatoare de la centrul cardio-vasomotor din formațiunea reticulată bulbară și centrul cardioaccelerator din hipotalamus. Aceste fibre aferente sunt fie stimulative (adrenergice), fie inhibitoare (serotoninerge). Axonii neuronilor preganglionari medulari sunt fibre preganglionare colinergice, ce urmează traseul rădăcinii anterioare și al trunchiului nervului spinal, pe care îl părăsesc prin ramura comunicantă albă. Pe această cale, fibrele ajung la ganglionii simpatici ai lanțului paravertebral cervical (superior și mijlociu, stelat, primii 3-4 toracali), unde fac sinapsă cu neuronii postganglionari. Fibrele postganglionare din ganglionii cervicali formează nervii cardiaci (superior, mijlociu și inferior) și intră în constituția plexului cardiac Wrisberg, prin care se distribuie la inimă. Fibrele simpaticului drept se distribuie nodulului S-A și mușchiului atrial, controlând mai ales frecvența cardiacă (fibrele acceleratoare), în timp ce fibrele simpaticului stâng se distribuie nodulului A-V, fasciculului His și mușchiului ventricular, controlând forța de contracție (fibrele augmentatoare). Fibrele postganglionare simpatică din ganglionii toracici ajung direct la inimă.

Terminațiile nervoase simpatică din miocard formează o rețea fină. Pe parcursul lor, ele prezintă varicozități ce conțin granule de noradrenalină, sintetizată intraneuronal. La nivelul varicozităților se realizează contactele sinaptice cu celulele efectoare. Noradrenalina eliberată la acest nivel acționează asupra receptorilor specifici din membrana celulelor efectoare, determinând efectele caracteristice activării simpaticului (vezi mai jos).

Inervația parasimpatică a inimii. Se realizează prin fibrele preganglionare ale nervului vag, cu origine în neuronii cardioinhibitori din nucleul dorsal al vagului (planșeul ventriculului IV). Aceste fibre preganglionare lungi (colinergice) urmează traiectul nervului vag pe care îl părăsesc pentru a intra în constituția plexurilor cardiace. Ele se termină făcând sinapsă cu neuronii postganglionari parasimpatici situați în grosimea peretelui atrial. Axonii acestor neuroni sunt fibre scurte, amielinice, asemănătoare cu cele simpatică. Ele fac sinapsă cu elementele efectoare fie la nivelul varicozităților de pe traiect, fie prin intermediul unor butoni terminali. În ambele cazuri, în regiunea presinaptică se află vezicule de acetilcolină care se sintetizează local prin mecanismele deja descrise. Și în acest caz, efectele stimulării se realizează prin receptori specifici (colinergici) postsinaptici. Fibrele cu origine în vagul drept se distribuie predominant nodulului S-A. Stimularea lor determină preferențial scăderea frecvenței și oprirea cordului. Fibrele corespunzătoare vagului stâng se distribuie mai ales nodulului A-V și fasciculului His. Stimularea lor determină preferențial blocul atrio-ventricular. Dacă mușchiul atrial are o inervație parasimpatică colinergică relativ bogată, miocardul ventricular este sărac în fibre colinergice, fiind relativ independent de acțiunea directă a stimulării vagului. Aceeași observație este valabilă și pentru patul coronar.

Efectele cardiace ale stimulării simpaticului și parasimpaticului. La nivel cardiac, mediatorul fibrelor simpatic, noradrenalina, determină efectele specifice acționând asupra receptorilor adrenergici. Beta-receptorii adrenergici, de departe predominanți, au fost descriși atât pe celulele miocardice, cât și în patul coronarian. Alfa-receptorii sunt mult mai rari (doar în coronare și nodulul S-A).

Acetilcolina, mediatorul fibrelor parasimpatice, își exercită acțiunile cardiace prin intermediul receptorilor colinergici de tip M (muscarinici). Rarii receptori colinergici de tip N (nicotinici) se localizează doar pe neuronii postganglionari (intramurali) parasimpatici.

Prin intermediul receptorilor menționați, simpaticul și parasimpaticul influențează principalele funcții cardiace, determinând adesea efecte de tip coronar (tabelul 6.III).

TABELUL 6.III

Acțiunea simpaticului (S.) și a parasimpaticului (P.S.) asupra funcțiilor inimii

Funcție	P.S./S.	Efect	Receptor	Mecanism
Batmotropă (Excitabilitate)	P.S.	-	M	Creșterea gK^+ - hiperpolarizare, scurtarea PA
	S.	+	Beta	Acumularea de cAMP - creșterea gNa^+ și gCa^{2+} , scurtarea depolarizării diastolice
Cronotropă (Frecvență)	P.S.	-	M	Crește durata depolarizării diastolice
	S.	+	Beta	Scade durata depolarizării diastolice
Dromotropă (Conducere)	P.S.	-	M	Crește durata depolarizării diastolice
	S.	+	Beta	Scade durata depolarizării diastolice
Inotropă (Forță contractilă)	P.S.	(atriale)	M	Scurtarea P.A. - reducerea disponibilității de Ca^{2+} pentru mecanismul contractil
	S.	+ (evidente)	Beta	Activarea glicolizei (cAMP) Creșterea influxului de Ca^{2+}
Tonotropă (Tonus)	P.S.	-	M	
	S.	+	Beta	

6.6.2.1. Interacțiuni simpatico-parasimpatice cu rol în modularea activității cardiace

Acuratețea deosebită a adaptării pompei cardiace la solicitări rezultă din interacțiunea celor două sisteme, care, acționând simultan și antagonic, realizează adaptări gradate și fine. În afara antagonismului evident exercitat direct și pe structuri efectoare prin receptori (vezi mai sus), echilibrul oscilant simpatico-parasimpatic are și alte aspecte, nu mai puțin importante. Terminațiile nervoase presinaptice prezintă receptori presinaptici inhibitori, specifici pentru mediatorul sistemului opus. Astfel, pe fibrele colinergice

presinaptice există receptori alfa-, adrenergici, în timp ce pe fibrele adrenergice există receptori colinergici M. În acest mod, mediatorul eliberat din terminația nervoasă nu numai că determină efectele specifice sistemului, ci determină și o reducere a eliberării mediatorului din fibrele sistemului opus (antagonism reciproc presinaptic). La aceasta poate fi adăugată și posibilitatea unei autoinhibiții presinaptice (feed-back negativ), în care mediatorul, ajuns în spațiul interstițial, difuzează și activează la nivelul autoreceptorilor presinaptici (receptori colinergici M, pe fibrele parasimpatice, și alfa-, adrenergici, pe fibrele simpatic), blocând propria sa eliberare. În cazul parasimpaticului, s-a descris și posibilitatea unui feed-back pozitiv. Acetilcolina eliberată din fibrele postganglionare poate difuza până la nivelul celulelor ganglionare, activând receptori colinergici N stimulatori, care prelungesc eliberarea postsinaptică a mediatorului.

Un aspect deosebit de important este legat de interacțiunea celor două sisteme la nivelul central. Centrii vegetativi simpatici și parasimpatici, activați permanent de aferențele zonale reflexogene, descarcă continuu spre periferie un flux de impulsuri. Această activitate bazală continuă a fost descrisă sub denumirea de tonus simpatic și, respectiv, parasimpatic. Astfel se explică de ce, de exemplu, secțiunea vagului sau atropinizarea sunt urmate de efecte simpatic (tahicardie, creșterea forței cardiace), iar simpatectomia determină efecte parasimpatice.

Fenomenul de scăpare. Stimularea prelungită a vagului determină oprirea inimii pentru o perioadă de 4-10 s, după care activitatea cardiacă se reia, chiar dacă stimularea continuă. În explicarea acestui fenomen au fost implicate multiple mecanisme, cum ar fi: (1) umplerea ventriculului în cursul opririi diastolice reprezintă un stimul suficient pentru reluarea activității; (2) stimularea prelungită determină epuizarea rezervelor de acetilcolină; (3) stimularea prelungită determină desensibilizarea receptorilor colinergici postsinaptici care nu mai pot fi activați; (4) excesul de acetilcolină determină un feed-back negativ presinaptic, înlocuind propria sa eliberare; (5) în trunchiul nervului vag există și fibre postganglionare simpatic, a căror stimulare poate determina reluarea activității cardiace. Centrii nervoși implicați în reglarea activității cardiace sunt situați la diferite nivele ale sistemului nervos central (bulb, punte, hipotalamus, sistemul limbic, cerebel, scoarța cerebrală). Aceștia sunt în strânsă legătură cu centrii vasomotori, ceea ce justifică utilizarea termenilor de centrii cardio-vasomotori care, în concepția actuală, sunt considerați a fi organizați sub forma unor circuite nervoase complexe interconectate care integrează și transmit semnale ce influențează activitatea inimii și a vaselor. Activitatea lor poate fi modelată de o serie de substanțe endo- sau exogene, mai ales prin intermediul arici postrema, zona circumventriculară lipsită de barieră hemato-encefalică unde sunt detectate modificările substanțelor aflate în circulație, ca și modificările neuronale din alte zone ale creierului prin intermediul receptorilor pentru angiotensină, vasopresină, catecolamine, acetilcolină, opiacee etc.

6.6.3. MECANISME EXTRINSECI UMORALE

Activitatea cardiacă poate fi modificată și ca urmare a unor semnale chimice din mediul intern. O serie de hormoni, substanțe biologice active endogene și unii produși de metabolism pot acționa asupra celulelor miocardice, adaptându-le activitatea la condiția metabolică respectivă.

Catecolaminele: adrenalina și noradrenalina din terminațiile nervoase simpatic, țesutul cromafin dispersat și medulosuprarenal acționează asupra receptorilor adrenergici menționați mai sus, determinând efectele activatoare specifice.

Insulina exercită efecte inotrop-pozitive, favorizând captarea și consumul aerob de glucoză.

Glucagonul, acționând prin receptori specifici, activează adenilat ciclaza și producerea de cAMP, cu efecte de tip simpatic.

Tiroxina acționează măind oxidările celulare. Are acțiuni cromotrope pozitive directe pe nodulul S-A. Acțiunea sa inotrop-pozitivă este probabil indirectă, realizându-se prin facilitarea acțiunii noradrenalinei.

Hormonii corticosuprarenali, angiotensina și serotonina determină, de asemenea, efecte inotrop-pozitive.

Hipoxia, hipercapnia și acidoza accentuate deprimă forța sistolică cardiacă, interferând mecanismul molecular contractil.

Acțiuni directe sau indirecte asupra activității inimii mai au parathormonul, somatotropul, adenoza, endotelinele, NO, sistemul renină-angiotensină, prostaglandinele.

7. FIZIOLOGIA SISTEMULUI VASCULAR

Cea de a doua componentă a aparatului circulator este reprezentată de sistemul tubular închis, constituit din artere, vene și capilare. Acestea asigură transportul sângelui de la motopompa cardiacă propulsoare la nivelul diverselor țesuturi și organe și, de aici, înapoi la inimă, în vederea aprovizionării celulelor cu O_2 și nutrimente, pe de o parte, și a îndepărtării produșilor toxici de metabolism celular (CO_2 , cetoacizi și alți metaboliți), pe de altă parte. Datorită dispoziției în serie a arterelor, capilarelor și venelor care aparțin mării circulații cu cele ale micii circulații, cantitatea de sânge deplasată ritmic de ventriculul stâng în circulația sistemică (generală) este egală cu cea propulsată de ventriculul drept în arterele pulmonare (fig. 7.1).

În timp ce vasele circulației pulmonare asigură deplasarea întregului volum sistolic între plămâni și inimă, arterele circulației generale realizează distribuția acestuia în paralel și simultan la toate țesuturile și organele prin intermediul ramificațiilor arteriale, al căror număr crește paralel cu scăderea progresivă a diametrului vaselor.

Fluxul sanguin adecvat fiecărui țesut sau organ este reglat și adaptat la necesitățile variabile ale teritoriului respectiv, prin mecanisme chimice locale și neuro-umorale generale, fără modificări importante ale circulației sistemice. La rândul lor, schimburile lichidiene dintre sânge și celulele beneficiare se efectuează la nivelul vastei rețele capilare (de aproximativ $1\,000\,m^2$ în întregul organism), cu participarea lichidului interstițial ca punte de legătură între cele două sectoare. Cea mai mare parte din plasma interstițială este colectată la nivelul venulelor și transportată la inimă de către vene, al căror număr scade paralel cu creșterea diametrului.

Spre deosebire de artere care asigură distribuția sângelui în întregul organism, venele realizează colectarea și întoarcerea acestuia la nivelul pompei cardiace aspiro-respingătoare.

O mică fracție (1/10) din plasma interstițială va fi colectată și transportată spre inimă pe calea derivată a sistemului vascular limfatic. Ambele sectoare vasculare prezintă anumite particularități structurale ce le conferă proprietăți și roluri fiziologice distincte.

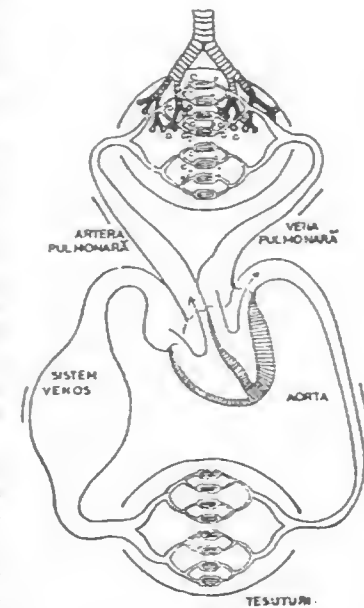


Fig. 7.1. Sistemul cardio-vascular al mării și micii circulații.

7.1. PARTICULARITĂȚI MORFO-FUNCȚIONALE ALE SISTEMULUI VASCULAR

Caracteristicile structurale ale diferitelor tipuri de vase sanguine (indiferent de calibrul și tipul lor) la om sunt prezentate în tabelul 7.1.

TABELUL 7.1

Diametrul lumenului, grosimea peretelui și suprafața de secțiune a vaselor sanguine la om (după Gregg, 1966)

Vasul	Diametrul lumenului	Grosimea peretelui	Suprafața de secțiune (cm ²)
Aortă	2,5 cm	2 mm	4,5
Arteră	0,4 cm	1 mm	20
Arteriola	30 μm	20 μm	400
Capilar	6 μm	1 μm	4500
Venulă	20 μm	2 μm	4000
Venă	0,5 cm	0,5 mm	40
Vena cavă	3 cm	1,5 mm	18

Din punct de vedere structural, vasele sanguine conțin un strat endotelial, adjacent lumenului, la nivelul intimei, țesut elastic sau muscular la nivelul mediei și țesut fibros adventiceal.

Posedând capacitatea de a sintetiza și elibera asemenea factori de modulare a reactivității musculaturii netede vasculare, stratul endotelial pare să îndeplinească roluri mult mai importante decât simpla izolare a masei sanguine circulante de peretele vascular propriu-zis.

La nivelul mediei, toate vasele, exceptând capilarele, conțin cantități variabile de fibre elastice, de colagen și fibre musculare netede.

Arterele, ca vase ce pleacă de la inimă, se împart, în funcție de predominanța țesutului elastic sau muscular și de mărimea lor, în:

- artere de tip elastic sau mari;
- artere de tip muscular sau medii;
- arteriole.

Fibrele elastice formează o rețea lamelară densă, dispusă concentric, sau spiralat, mai ales în tunica medie a aortei și arterelor mari. Acestea sunt tensionate și alungite în timpul sistolei ventriculare, dezvoltând o importantă tensiune elastică asupra masei sanguine odată cu revenirea la lungimea diastolică inițială.

Marea distensibilitate a arterelor elastice de la baza inimii a fost recunoscută încă din secolul trecut (Ernst Weber, 1834) și comparată cu o veritabilă cameră hidrolică de amortizare și compresie (Windkessel), care crește randamentul propulsor al pompei cardiace. În timp ce ejecția sângelui, produsă de sistola ventriculară, determină distensia aortei și arterelor pulmonare însoțită de acumularea unei părți din energia potențială a cordului, reculul elastic diastolic contribuie la transformarea acestei energii în energie cinetică și la deplasarea sângelui spre teritoriul capilar în tot restul ciclului cardiac (fig. 7.2).

Fibrele colagene din pătura medie și adventicea vaselor sunt dispuse, de asemenea, spiralat, longitudinal sau dezordonat, formând o rețea fibrilară mult mai rezistentă la întindere decât fibrele elastice. Ele exercită o contrapresiune asupra masei sanguine numai după ce vasul a suferit un oarecare grad de destindere.

Fibrele musculare netede, spre deosebire de cele elastice, predomină la nivelul tunicii medii a arterelor de calibr mijlociu și mic, denumite și artere de distribuție. Fibrele musculare sunt structuri

dinamice, puternic reactive, dispuse circular, ce asigură tonusul vascular bazal și capacitatea de ajustare a lumenului vaselor și debitului sanguin local la necesitățile variabile ale țesuturilor și organelor.

Țesutul fibros se găsește mai ales la nivelul adventiceei. În plus, aceasta conține fibre colagene de susținere, o rețea elastică tridimensională (limitanta elastică externă), vase nutritive (*vasa vasorum*) și filete nervoase mielinice și amielinice.

Cele trei straturi ale arterelor (intima, media și adventicea) sunt adaptate funcțional, la nivelul arteriolelor, pentru a realiza scăderea presiunii sanguine și distribuția sângelui în patul capilar. În timp ce intima este reprezentată doar de endoteliu și limitanta elastică internă, tunica medie a arteriolelor este formată din fibre musculare netede printre care se găsesc fibre elastice și reticulare. Adventicea este însă bine reprezentată până la nivelul locului de trecere spre capilarul arterio-venos (metarteriolă), unde persistă doar câteva celule musculare netede, formând sfincterul precapilar. Relațiile dintre structura vaselor și caracteristicile funcționale ale circulației sanguine în diversele sale sectoare sunt ilustrate în fig. 7.3.

Pe măsură ce presiunea sanguină scade, la nivelul arterelor se reduc fibrele elastice în favoarea celor musculare, pentru ca în teritoriul capilar să dispară ambele tipuri de fibre.

Capilarele sanguine sunt de două feluri: adevărate și arterio-venoase. Spre deosebire de capilarele arterio-venoase, capilarele adevărate sunt lipsite de elemente musculare și inervație proprie, având în structura lor numai celule endoteliale și o membrană bazală cu grosime de aproximativ 1 mm. După cum endoteliul prezintă sau nu discontinuități, capilarele se împart în continue (comune) și fenestrate. Un loc

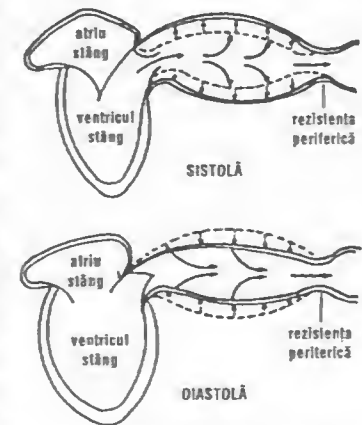


Fig. 7.2. Modificările sistolo-diastolice ale peretelui aortic.

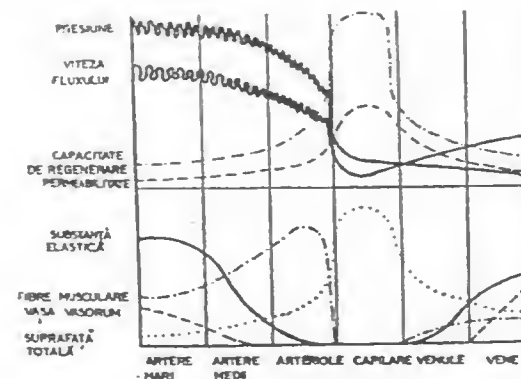


Fig. 7.3. Relația între structura și funcțiile vaselor sanguine.

important îl dețin anastomozele arterio-venoase în anumite teritorii vasculare, cum sunt regiunea palmară, degetele sau lobulul urechii, prevăzute cu musculatură netedă și o abundentă inervație vegetativă.

Venele, ca sistem vascular colector și transportor de sânge de la nivelul patului capilar la inimă, sunt formate din aceleași trei tunici descrise la artere, cu deosebirea că media este mai slab dezvoltată, lumenul apare mai mare, iar adventicea reprezintă până la 80% din grosimea peretelui venos.

Dacă venulele, rezultate din confluența câtorva capilare, sunt formate doar din endoteliu înconjurat de o pătură subțire de fibre reticulare și puține celule musculare netede, venele propriu-zise posedă, la nivelul tunicii medii, suficiente celule musculare orientate circular și separate de fibre elastice și fibroblaști. La rândul său, adventicea venelor conține fascicule de mușchi netezi dispuse longitudinal într-o bogată rețea de țesut conjunctiv-elastic. Ca particularități topografice este de reținut că venele supracardiacă sunt fibro-elastice, iar cele infracardiacă sunt musculo-fibroase. De aici, venomotricitatea mai pronunțată a teritoriului venos din jumătatea inferioară a corpului.

Particularitățile morfo-funcționale ale vaselor limfatice, mai puțin structuralizate, vor fi menționate la circulația limfatică.

7.2. PROPRIETĂȚILE FIZIOLOGICE ALE SISTEMULUI VASCULAR

Predomnanța țesutului elastic atât în aortă și ramurile sale, cât și în venele mari, precum și a celui muscular în restul arterelor și venelor conferă sistemului vascular următoarele proprietăți fiziologice:

- **elasticitatea**, reprezentată de capacitatea vaselor și îndeosebi a arterelor mari și venelor de a se destinde și a reveni la forma inițială, în funcție de variațiile de volum și presiune ale coloanei de sânge din interiorul lor. Prin destindere, arterele mari realizează, pe de o parte, amortizarea pulsului cardiac și creșterea randamentului inimii, iar, pe de altă parte, uniformizarea și transformarea scurgerii sacadate în scurgere continuă cu debit crescut. Ilustrativ din acest punct de vedere este clasică experiența a lui Marey: dacă se permite scurgerea unui lichid dintr-un vas printr-un tub lateral cu două brațe, din care unul este de sticlă iar altul de cauciuc, se constată că întreruperea ritmică a jetului de scurgere prin clampare determină modificări calitative și cantitative ale procesului de deplasare lichidiană prin cele două tuburi. În timp ce prin tubul de sticlă deplasarea lichidului este sacadată, prin tubul de cauciuc scurgerea se prezintă sub forma unui jet mai mult sau mai puțin continuu, cu debit crescut, în funcție de diametrul tubului (fig. 7.4).

Datorită elasticității arteriale, scurgerea sângelui prin arterele mici secționare are loc continuu și numai în cazul vaselor de calibru mare se face sub formă de jet;

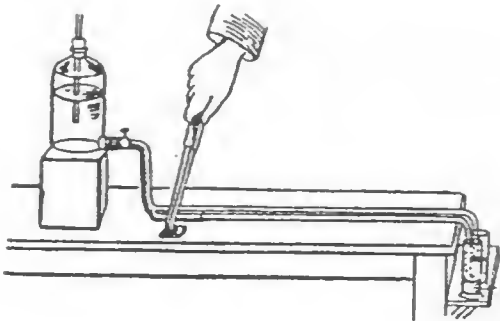


Fig. 7.4. Influența elasticității tubulare asupra debitului de scurgere.

- **contractilitatea** constă în capacitatea fibrelor musculare din mezarieră și vene de a se contracta și relaxa sub acțiunea diverșilor factori nervoși și umorali. Fenomenul cunoscut sub numele de vasomotricitate are loc îndeosebi la nivelul musculaturii netede arteriole, care prezintă sensibilitate maximă față de factorii neuro-umorali de reglare a tonusului vascular. Prin mecanismul vasoconstricției și vasodilatației arteriole se realizează scăderea sau creșterea tonusului vascular într-un anumit teritoriu, cu răsunetul funcțional local și general corespunzător.

Relaxarea musculaturii netede arteriole, de exemplu, va determina pe plan local vasodilatație și creșterea fluxului sanguin în teritoriul respectiv, iar pe plan general, tendința la scădere a presiunii arteriale, ca urmare a sustragerii unei cantități de sânge din circulație. Printr-un astfel de mecanism, modificarea contractilității vasculare asigură adaptarea circulației la nevoile metabolice crescute ale musculaturii în stare de activitate și, totodată, debarasarea acestora de cataboliții toxici rezultați din metabolismul intens muscular. Acest fenomen de adaptare a circulației la nevoile tisulare crescute poartă numele de *hiperemie funcțională* și se întâlnește la nivelul tuturor organelor în stare de hiperactivitate.

La rândul său, constricția arteriole provoacă efectele locale și generale inverse, de tip ischemiant în teritoriul subiacent și hipertensiv în restul arborelui arterial, ca urmare a creșterii rezistenței periferice și încărcării patului vascular suprajacent. De menționat este faptul că presiunea critică de închidere a arteriolelor, care în condiții normale variază în jurul a 20 mmHg, depinde de tonusul musculaturii netede arteriole, subordonat inervației simpatice. Denervarea simpatică scade presiunea critică de închidere a arteriolelor la 0, iar stimularea nervilor simpatici o crește la valori de 50–60 mmHg. Datorită acestui fapt, fenomenele de predominanță simpatică din timpul stărilor emotive, expunerii la frig etc. se însoțesc adeseori de tulburări de irigație a unor teritorii vasculare.

7.3. CIRCULAȚIA ARTERIALĂ

Grație proprietăților menționate (elasticitate și contractilitate) arterele îndeplinesc în organism două mari roluri. Ele constituie mai întâi un veritabil *rezervor amortizor de contracție cardiacă* (Windkessel, după autorii germani); energia potențială acumulată în timpul distensiei sistolice va acționa în timpul diastolei asupra masei sanguine ca o veritabilă cameră de compresie, determinând deplasarea sângelui în continuare spre țesuturi; în al doilea rând, arterele îndeplinesc rol de *canale conductoare* ce asigură deplasarea sângelui de la cord la periferie, în vederea transportului de oxigen și substanțe nutritive, necesare combustibililor și activității tisulare.

7.3.1. HEMODINAMICA VASCULARĂ

Parametrul fundamental al hemodinamicii este debitul sanguin. Debitul este volumul ce curge prin secțiunea transversală în unitatea de timp; $Q = \Delta V / \Delta t$. Viteza de curgere este un parametru derivat, reprezentat de debitul volumic (D) raportat la aria secțiunii transversale (S); $v = d / dt = \Delta V / S \Delta t = D / S$.

Particularitățile structurale și funcționale menționate fac arterele mari să fie vase conductive, în timp ce arterele terminale și arteriolele sunt vase de rezistență. La rândul lor, venele sunt vase capacitive, prin care sângele circulă în regim de joasă presiune. Indiferent de teritoriul vascular, deplasarea sângelui prin



Fig. 7.5. Influența presiunii și rezistenței periferice asupra debitului de scurgere.

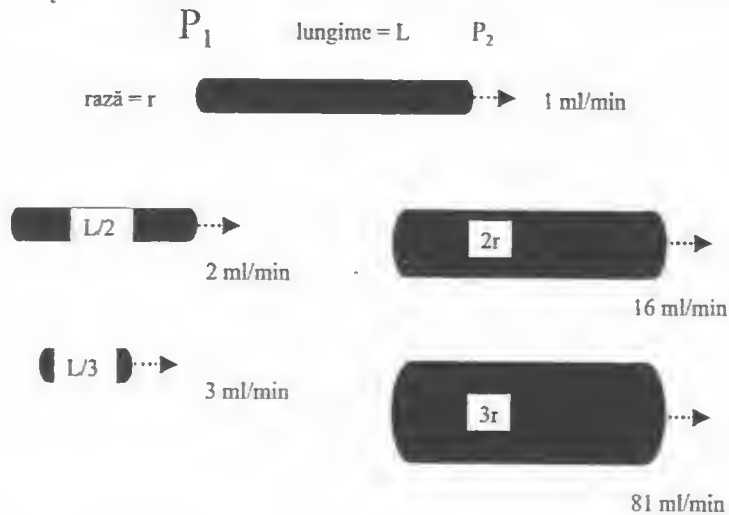


Fig. 7.6. Influența lungimii și a razei vasului asupra rezistenței la curgere și efectul asupra debitului în aceleași condiții de presiune.

vasele sanguine este determinată de doi principali factori: (1) diferența de presiune dintre cele două extremități ale vasului (P_1 și P_2), ca forță de împingere și deplasare a sângelui din teritoriul cu presiune înaltă spre cel cu presiune joasă; (2) rezistența pe care vasele o opun scurgerii lichidiene.

Relația dintre presiune, rezistență și debit sanguin este ilustrată în fig. 7.5.

Cu cât gradientul de presiune va fi mai mare, cu atât debitul va fi mai mare. Rezistența, la rândul ei, depinde de diametrul și lungimea vasului, pe de o parte, și de vâscozitatea lichidului de scurgere, pe de altă parte.

Fenomenul de deplasare a sângelui în sistemul vascular fiind supus legilor hidrodinamicii din fizica clasică, debitul sanguin (D) este direct proporțional cu diferența de presiune (P) și invers proporțional cu rezistența (R), după formula: $D = \frac{P}{R}$.

Diferența de presiune se realizează în cazul circulației arteriale cu participarea a trei factori: cardiac, vascular și sanguin.

Factorul cardiac este reprezentat de volumul bătaie (70 ml) și, respectiv, debitul cardiac (5–6 litri), care depind de forța de contracție a inimii, întoarcerea venoasă și frecvența cardiacă. Modificarea unuia din acești trei termeni atrage după sine variații în plus sau în minus ale debitului cardiac, cu răsunetul corespunzător asupra presiunii cu care sângele circulă prin artere, așa cum se va vedea în continuare.

Factorul vascular, dependent de elasticitatea și motricitatea vaselor, constituie ceea ce în termeni consacrați poartă numele de rezistență periferică. Aceasta privește în mod predominant arterele terminale și arteriolele și, în mai mică măsură, teritoriul capilar și venelele.

Rezistența vasculară, așa cum am arătat, este în funcție de lungimea și diametrul vasului, precum și de vâscozitatea sângelui: cu cât un vas este mai lung, cu atât rezistența sa este mai mare și debitul de scurgere, devine mai mic și invers. Influența lungimii vasului asupra debitului de scurgere este prezentată în fig. 7.6.

Cum lungimea vaselor rămâne aceeași, modificările de diametru reprezintă principalul factor de variație a rezistenței periferice. Creșterea diametrului, determinând scăderea rezistenței periferice, se

însoțește de valori crescute ale debitului de scurgere. Fenomene inverse, de scădere a fluxului sanguin, se vor produce ca urmare a creșterii rezistenței periferice, indusă de reducerea diametrului vascular.

Rezistența la flux poate fi calculată în funcție de debitul sanguin local și diferența de presiune din vasul respectiv și exprimată în unități de rezistență periferică (URP).

Rezistența periferică totală are valoarea medie de 1 URP, cu variații în plus sau în minus între 0,2 și 5 URP; rezistența pulmonară totală este doar de 0,14 URP, cu variații între 0,04 și 1 URP.

Conform legii lui Poiseuille, debitul de curgere prin tuburi liniare este invers proporțional cu lungimea tubului (L) și vâscozitatea lichidului (η) și proporțional cu diferența de presiune ($P = P_1 - P_2$) și puterea a patra a razei; $D = \frac{P \pi r^4}{8 \eta L}$ (vezi fig. 7.6). Altfel spus, rezistența la curgere este proporțională cu lungimea vasului și vâscozitatea lichidului și invers proporțională cu r^4 : $R = \frac{8 \eta L}{\pi r^4}$.

Faptul este ușor de înțeles dacă se ține seama că volumul și viteza de scurgere a lichidului circulant cresc în proporție geometrică, odată cu creșterea suprafeței de secțiune a vasului, ca urmare a reducerii rezistenței create de fricțiunea straturilor laminare ale unei lichidiene de pereții vasculari.

Fenomenul de creștere a debitului de sânge dintr-un vas în funcție de diametrul acestuia poartă numele de conductanță.

Conductanța, ca reciprocă a rezistenței vasculare, crește, în condițiile unei presiuni date, proporțional cu diametrul vasului multiplicat de patru ori. Simpla dublare a diametrului determină creșterea de 16 ori a debitului, în condițiile creșterii diametrului vascular de patru ori, debitul de scurgere va crește de 256 de ori, așa cum se poate vedea în fig. 7.7.

Fenomene inverse, de reducere până la suprimare a fluxului sanguin, se vor produce în cazul reducerii progresive a diametrului vascular.

Așadar, mici variații ale diametrului vaselor sunt capabile să determine importante modificări în plus sau în minus ale debitului de scurgere, ca urmare a influențării conductanței vasculare.

Complianța sau capacitanța, spre deosebire de conductanță, se referă la efectele presiunii asupra distensibilității și volumelor vasculare. Vasele sanguine, fiind distensibile, vor suferi modificări semnificative nu numai ale diametrului, ci și ale volumului lor, ori de câte ori vor apărea variații într-un sens sau altul ale presiunii intravasculare.

Complianța se definește pentru o incintă (vas) ca raport între variația de volum și variația de presiune ($C = \Delta V / \Delta P$), adică panta curbei de variație a presiunii în funcție de volum. Elastanța este inversul complianței, adică panta curbei volum – presiune, analog relației lungime – forță (vezi această relație pentru mușchiul striat și diagrama volum – presiune pentru ventriculul stâng). Așadar, un vas compliant poate primi volume mari de lichid, cu modificări mici de presiune, deoarece peretele său este „moale”, distensibil, distensia prin volum determinând apariția unei tensiuni mecanice parietale modeste. Ca efect al legii Laplace, aceasta determină o presiune statică modestă a lichidului din interior; pentru o secțiune circulară tensiunea parietală (T) este proporțională cu presiunea luminală (p) și cu inversul razei ($T = p/2R$).

Dacă se raportează complianța la volumul inițial, se obține distensibilitatea, sau complianța unitară ($C_0 = C/V_0$), care este o caracteristică a materialului parietal, în timp ce complianța (totală) este un parametru al vasului în întregime.

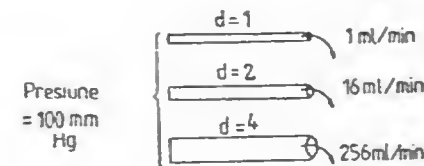


Fig. 7.7. Influența diametrului (d) asupra debitului de scurgere.

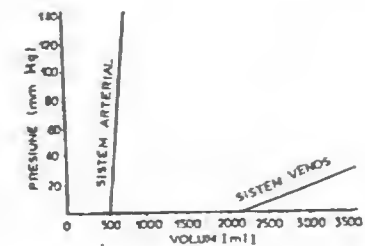


Fig. 7.8. Curba volum-presiune a sistemelor arterial și venos.

În funcție de gradul de distensibilitate și volumul unui vas se poate calcula complianța acestuia. Produsul dintre cele două variabile reprezintă distensibilitatea maximă sau complianța vasculară. Cum venele sunt de 6-8 ori mai distensibile decât arterele și au un volum de trei ori mai mare decât acestea, complianța venoasă este de aproximativ 24 de ori mai mare decât a arterelor. Datorită acestui fapt, modificările de presiune vor influența într-o măsură mult mai mare complianța venoasă decât pe cea arterială. Mai exact, creșterea presiunii dependentă de volum va fi de 24 mmHg în artere pentru fiecare mmHg din teritoriul venos. Venele, fiind capabile să stocheze mari cantități de sânge fără modificări importante ale presiunii venoase, sunt denumite și arii de depozit ale circulației. La nivelul acestora se găsesc 2 500-2 800 ml de sânge, în timp ce arborele arterial conține doar 700-750 ml de sânge.

Curba volum-presiune la nivelul segmentelor arterial și venos ale arborelui vascular este redată în fig. 7.8. Atât stimularea, cât și inhibiția simpatică, modificând tonusul muscularității netede vasculare, influențează curbele respective cu răsunet corespunzător asupra fluxului sanguin dintr-un anumit teritoriu, în vederea depozitării sau deplasării sângelui în alte sectoare ale organismului. Ca exemplu se poate da creșterea tonusului simpatic în teritoriul venos din timpul hemoragiilor pentru a reduce dimensiunile sistemului vascular și a menține funcția circulatorie în limite mai mult sau mai puțin normale.

Complianța întârziată a vaselor, sau relaxarea de întindere, constă în pierderea unei părți din presiunea intravasculară după o perioadă de câteva minute de la întinderea progresivă a peretelui vascular. Fenomenul apare mai slab în artere și mai evident în teritoriul venos în urma distensiei elastice a venelor ori de câte ori volumul sanguin crește. Dacă se înregistrează presiunea intravasculară dintr-un segment de venă închis la ambele capete, introducerea unei noi cantități de sânge va determina creșterea presiunii, urmată de tendința la revenire a acesteia fără modificarea volumului. Complianța întârziată funcționează și în sens invers, dacă volumul sanguin scade în urma unor hemoragii. Restabilirea parțială a presiunii cu ajutorul complianței întârziate este ilustrată în fig. 7.9.

La baza complianței întârziate stau procese fizico-chimice de rearanjare a legăturilor existente între filamentele de actină și miozină, care permit glisarea lentă a acestora, revenirea parțială la poziția inițială și reducerea stării de tensiune parietală. În felul acesta, variațiile de complianță vasculară devin mijloace eficiente prin care vasele se adaptează la diversele condiții de suprasolicitare locală și generală a funcției circulatorii fără consecințe brutale asupra presiunii sanguine (efectul Bayliss).

Factorul sanguin de influențare a hemodinamicii este reprezentat de către vâscozitate, pe de o parte, și de volumul de sânge circulant, pe de altă parte.

Vâscozitatea, dependentă mai mult de prezența elementelor figurate suspendate în plasmă și mai puțin de conținutul în proteine a acesteia, constituie unul din principalii factori determinanți ai rezistenței periferice, alături de lungimea și diametrul vaselor. Ilustrativ din acest punct de vedere este faptul că vâscozitatea plasmăi apare doar de 1,2-1,3 ori mai mare decât a apei, iar aceea a sângelui este de 2,4 ori mai crescută decât a plasmăi.

Principalul factor de producere și menținere a vâscozității este raportul eritro-plasmatic (hematocrit). Acesta reprezintă valori mai ridicate în vasele mari decât în cele cu diametrul mic, cum sunt arteriolele, capilarele și venulele. La aceasta se adaugă tendința hematiilor de a se acumula în zona axială, centrală, a coloanei de sânge, în condițiile normale ale scurgerii laminare. Creșterea concentrației globulelor roșii din sânge, intensificând procesul de fricțiune dintre acestea și pereții vasculari, se însoțește de creșterea rezistenței periferice. De aici, efortul cardiac suplimentar pentru a asigura un flux sanguin adecvat la periferie, precum al pacienților cu poliglobulie hipoxică de altitudine. Însăși capacitatea limitată de deformare a hematiilor la nivelul capilarelor poate interveni ca factor de creștere a rezistenței la flux și de reducere a vitezei de circulație în teritoriul arteriolo-capilar. Peste 70% din rezistența periferică totală se

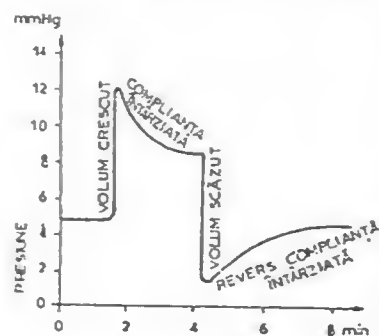


Fig. 7.9. Efectul presiunii intravasculară asupra complianței.

datorită de altfel rezistenței mari de la nivelul arterelor terminale, arteriolelor și capilarelor. În anemii, din contră, numărul hematiilor scăzând, viteza de circulație a sângelui crește, ca urmare a reducerii vâscozității, iar presiunea sanguină are tendința la scădere.

Volumul sanguin intervine cu rol determinant în asigurarea umplerii diastolice și debitului sistolic, pe de o parte, și în menținerea presiunii sanguine statice la o valoare ușor pozitivă (6-10 mmHg), pe de altă parte. Corespunzând gradului de umplere a sistemului vascular în absența activității contractile a inimii, presiunea sanguină statică, denumită și presiunea medie de umplere, contribuie la deplasarea sângelui din sistemul venos spre atriu drept, afectând indirect cantitatea de sânge propulsată de ventriculul stâng în marea circulație.

Arterele, ca vase de rezistență, conțin doar 18% din volumul total (15% în artere, 3% în arteriole), sistemul venos, fiind teritoriul de capacitanță, stochează până la 75% din volumul sanguin. Capilarele, deși prezintă o suprafață de secțiune enormă, fiind scurte, conțin doar 7% din volumul sanguin total. În timpul fiecărei bătăi cardiace, o parte din volumul sanguin este propulsat spre teritoriul capilar, după care revine pe cale venoasă în sectorul arterial al mării și micii circulații, în vederea reluării ciclului. Contrar volumului, rezistența vasculară este dată în proporție de peste 65% de teritoriul arterial (fig. 7.10).

Tipul de scurgere. În condiții fiziologice, scurgerea sângelui este laminară și paralelă cu axul vasului atât timp cât acesta se prezintă ca un tub cilindric rectiliniu. Viteza este mai mare în centrul decât la periferia coloanei de sânge, datorită aderenței stratului lichidian vâscos periferic de peretele tubului de scurgere și frecării pătuzilor lichidiene concentrice. Distribuția parabolică a diferitelor viteze de scurgere pe o secțiune longitudinală cu un maximum axial este prezentată în fig. 7.11.

Datorită vitezei mari de deplasare a unei lichidiene, la nivelul suprafețelor rugoase, curburilor, stenozelor sau anevrismelor, scurgerea poate deveni turbulentă, determinând apariția unor sufluri, ca manifestare stetacustică vasculară. În astfel de cazuri, particulele lichidiene nu se mai deplasează paralel cu axul vasului, ci sunt orientate perpendicular, dând naștere unor adevărate vârtejuri, care reduc viteza de deplasare a sângelui, așa cum se poate vedea în figură. Tipul de scurgere poate fi apreciat în funcție de numărul (indicele) Reynold, cu valoare normală sub 2 000.

Tendința de apariție a turbulenței se exprimă ca $Re = vdp/\eta$ (număr Reynold), unde v este viteza de curgere, d este diametrul, p este densitatea, iar η este coeficientul de vâscozitate. Pentru $Re > 2000$ curgerea devine turbulentă chiar în tuburi netede drepte.

O turbulență tranzitorie evidențiată de creșterea numărului Reynold (raportul între viteza de scurgere și vâscozitate) peste 2 000 se constată frecvent în partea proximală a aortei și arterelor pulmonare în timpul perioadei de ejeție. Dacă viteza de scurgere crește (cum este cazul eforturilor fizice) sau vâscozitatea scade (în anemii), turbulența poate apărea în toate arterele mari.

Așa cum s-a arătat la început, la același debit volumic viteza de curgere crește proporțional cu scăderea calibrului tubular, prin însăși natura fizică a acestor parametri. În sistemul vascular apare un pseudo-paradox, în sensul faptului că viteza de curgere scade spre periferie. Evident, aceasta se datorează

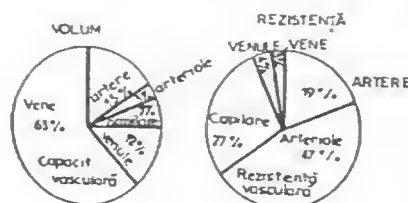


Fig. 7.10. Volumul și rezistența la flux în circulația sistemică.

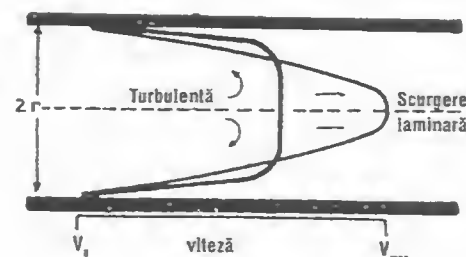


Fig. 7.11. Scurgerea laminară și turbulentă. $2r$, diametrul vasului.

faptului că debitul total (debitul cardiac) este condus spre periferie printr-o secțiune transversală totală din ce în ce mai mare (adică printr-un număr foarte mare de vase mai înguste), astfel că viteza de curgere în arterele mici este mai mică decât în cele mari; ramificarea intensă supra-compensează îngustarea. Din cauza fluxului discontinuu, viteza prezintă, de asemenea, o valoare mai ridicată în timpul sistolei decât al diastolei, mai ales în aortă și arterele mari. Dacă în sistolă deplasarea sângelui se realizează la nivelul aortei cu o viteză de 0,4–0,5 m/s, în timpul diastolei aceasta scade până la 0,2 m/s. Atât viteza de scurgere sistolică, cât și cea diastolică, denumită și viteză medie a fluxului, suferă importante modificări în plus sau în minus în funcție de forța de contracție a inimii, gradientul de presiune și debitul cardiac.

Cel de al doilea factor important de influențare a vitezei de deplasare a sângelui prin sistemul vascular este reprezentat de suprafața de secțiune a vaselor. Între scurgere și suprafața de secțiune a unui vas oarecare există relații de proporționalitate inversă. Viteza de scurgere scade progresiv pe măsură ce sângele ajunge la nivelul arterelor terminale și arteriolelor, atingând valoarea cea mai joasă de 0,3 mm/s la nivelul capilarelor (de o mie de ori mai mică decât în aortă). Datorită suprafeței mari de secțiune, timpul de trecere a sângelui printr-un capilar de lungime medie (0,5–1 mm) este de aproximativ 2,5 s. Relația dintre suprafața de secțiune totală, presiune și viteza de scurgere este prezentată în fig. 7.12.

Scăderea vitezei de scurgere este liniară în vasele ce au calibrul uniform și bruscă în cazul vaselor ce au calibrul neuniform, așa cum demonstrează clasică experiență a lui Bernouilli (fig. 7.13).

Vasele sanguine fiind conducte cu calibrul neuniform, presiunea și scurgerea nu scad liniar, ci relativ brusc, cea mai brutală scădere producându-se la nivelul teritoriului arteriolo-capilar.

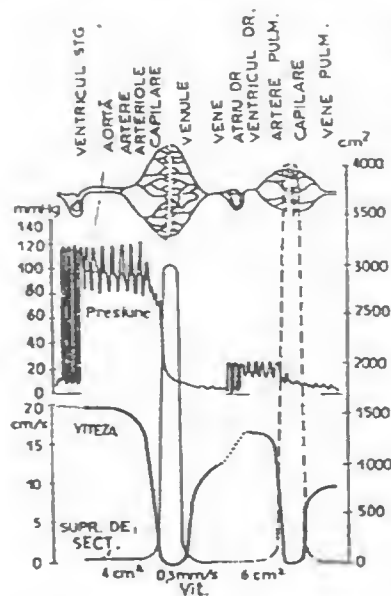


Fig. 7.12. Relațiile dintre presiune, suprafața de secțiune și viteza de scurgere.

Rezistența mare a acestuia, reducând atât presiunea, cât și viteza de scurgere a sângelui, de aproape 1 000 de ori, asigură timpul necesar schimbărilor lichidiene și nutritive dintre sânge și țesuturi.

Debitele de scurgere variază mult de la un organ la altul, precum și de la starea de repaus la cea de activitate. De la cei 5–6 litri de sânge, care reprezintă debitul cardiac de repaus, se poate ajunge la 20–30 de litri în condiții de efort. Distribuția sângelui în cele două situații este schematizată în (fig. 7.14).

De remarcat că în timp ce organele abdominale prezintă o scădere a debitului sanguin în condiții de efort intens, inima, musculatura scheletului și pielea primesc cantități mult mai mari de sânge în unitatea de timp, pe seama creșterii vitezei de circulație și a deplasării unei importante părți din masa sanguină spre organele hiperactive.

Metodele de determinare a cantității de sânge care trece printr-un punct oarecare al arborelui vascular sunt numeroase, începând cu tehnicile sângerânde clasice, bazate pe utilizarea rotametrilor, hemodromometrelor și traductoarelor electromecanice racordate la vasul respectiv și sfârșind cu metodele nesângerânde, pletismografice, debitmetrice și electromagnetice moderne. De o mare fidelitate sunt debitmetrul electromagnetic și debitmetrul ultrasonic Doppler. Acestea sunt capabile să înregistreze și variațiile fluxmetrice pulsatile mici și rapide.

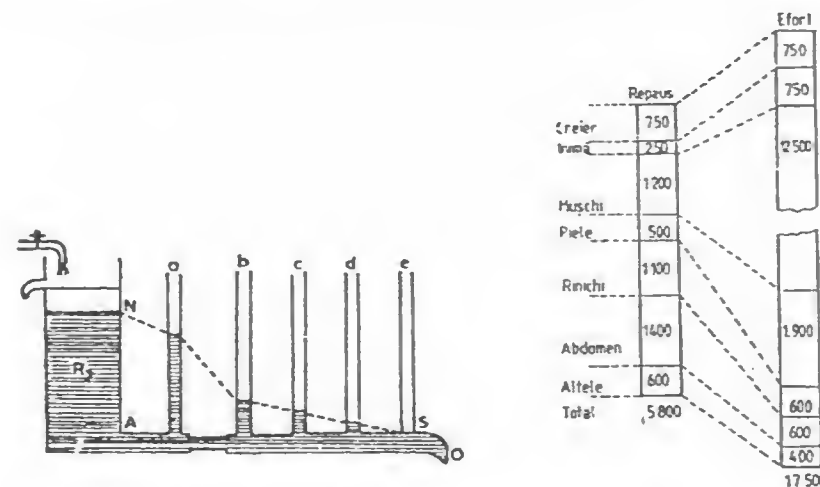


Fig. 7.13. Scăderea presiunii și vitezei de scurgere prin conducte cu calibrul neuniform. R_p, rezervor; a, b, c, d, e, conducte cu calibrul uniform; între a și b, calibrul îngustat.

Fig. 7.14. Distribuția sângelui în repaus și efort.

7.3.2. PRESIUNEA ARTERIALĂ

Sângele circulă în arterele mari sub o presiune, numită presiune arterială, care prezintă fluctuații în cursul ciclului cardiac, precum și alte oscilații fiziologice. Conform legii Laplace, în peretele arterial ia naștere o tensiune mecanică ($T = P/2r$). Această tensiune parietală este, din punct de vedere fizic, o forță și nu trebuie confundată cu așa-numita tensiune „arterială”, ce reprezintă o altă denumire pentru presiunea arterială (tradițională, destul de uzuală în diverse limbi, dar imperfectă științific), legată istoric și de determinarea presiunii arteriale în mod indirect, cu ajutorul aparatului numit tensiometru (vezi subcapitolul 7.3.2.2).

Arterele fiind distensibile, pomparea ritmică a sângelui este pulsatilă și fluctuantă, cu presiune mai mare în timpul sistolei decât al diastolei. La nivelul arterelor mari și mijlocii, de exemplu, presiunea arterială atinge valori de 120–140 mmHg în timpul sistolei și de 70–90 mmHg în diastolă, cu o medie de aproximativ 100 mmHg. Regimul de presiune înaltă din sistemul arterial reprezintă astfel rezervorul permanent de presiune hidrostatică ce asigură forța necesară de propulsie și deplasare continuă a masei sanguine spre teritoriul de schimb arteriolo-capilar al microcirculației.

Atât presiunea sistolo-diastolică, cât și presiunea arterială medie scad progresiv pe măsură ce sângele ajunge la nivelul vaselor cu diametru din ce în ce mai mic datorită rezistenței periferice crescânde. Scăderea presiunii în fiecare segment al arborelui vascular este direct proporțională cu rezistența periferică a segmentului respectiv.

Arteriolele, prezentând rezistența vasculară cea mai mare, produc scăderea cu aproximativ 50% a presiunii sanguine. La nivelul acestora, presiunea arterială medie scade la 50–55 mmHg, pentru ca în

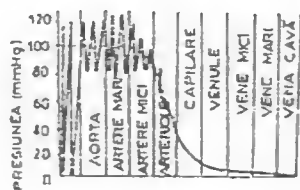


Fig. 7.15. Presiunea sanguină în diferite sectoare ale circulației sistemice.

7.3.2.1. Factorii determinanți ai presiunii arteriale

Așa cum s-a menționat deja, presiunea cu care sângele circulă în segmentul arterial al arborelui vascular depinde de forța de propulsie a cordului, de masa sanguină circulantă și de rezistența vasculară periferică. În mod schematic, factorii determinanți ai presiunii arteriale pot fi împărțiți în factori fizici și factori fiziologici.

Din prima categorie, a factorilor fizici, fac parte volumul sanguin și structurile elastice ale sistemului arterial.

La rândul lor, factorii fiziologici sunt reprezentați de volumul bătăie, frecvența cardiacă, debitul cardiac și rezistența periferică. Factorii fiziologici acționând prin intermediul unuia sau ambilor factori fizici, forța generată de cord în timpul contracției ventriculare va fi întreținută de elasticitatea arterelor mari (compliance arterială) și reglată de rezistența periferică a vaselor mici.

Inima, ca organ propulsor, intervine prin debitul cardiac, dependent, la rândul său, de forța contractilă a miocardului, de frecvența cardiacă și de întoarcerea venoasă. Cu cât umplerea diastolică este mai bună, cu atât forța de contracție va fi mai mare și debitul sistolic mai crescut, cu răsunet corespunzător asupra debitului cardiac și presiunii arteriale.

Scăderea forței de contracție a inimii în insuficiența cardiacă, reducând debitul bătăie, va predispuce la hipotensiune, paralel cu tulburarea hemodinamicii circulatorii.

Creșterea debitului cardiac produs de efort sau tahicardia emotivă predispun, din contră, la hipertensiune arterială.

La rândul său, întoarcerea venoasă, asigurând umplerea diastolică, deține un rol important în producerea variațiilor de debit sistolic și, prin intermediul acestuia, ale presiunii sanguine sistolo-diastolice. Cu cât întoarcerea venoasă va fi mai mare, cu atât umplerea diastolică și cantitatea de sânge propulsat în timpul sistolei în sistemul arterial vor fi mai crescute și presiunea diferențială sistolo-diastolică (presiunea pulsului) mai amplă. Amplitudinea presiunii pulsului depinde și de compliancea (distensibilitatea maximă) sistemului arterial. Cu cât compliancea va fi mai mare, cu atât creșterea presiunii sub influența volumului bătăie va fi mai mică. Scăderea compliancei arteriale la vârstnici de cauză aterosclerotică se însoțește de regulă atât de suprasolicitarea cordului, cât și de creșterea presiunii pulsului.

Timpul de ejecție a sângelui din cord în vasele mari afectează, de asemenea, presiunea pulsului arterială. În timp ce ejecția rapidă cauzează creșterea presiunii pulsului, propulsia lentă a aceluiași volum de sânge în aortă va determina variații mai mici ale presiunii diferențiale sistolo-diastolice.

În sfârșit, conductele vasculare pot modifica volumul bătăie în funcție de cantitatea de sânge care a trecut din artere în vene, ca factor important al întoarcerii venoase și umplerii diastolice.

sectorul proximal (arteriolar) al capilarelor să ajungă la 30–35 mmHg, iar în cel distal (capilarul venos) să atingă doar 10–12 mmHg. Scăderea presiunii continuă în teritoriul venos al circulației de întoarcere, prezentând valori minime de până la 0 sau chiar –2 mmHg în atrul drept (fig. 7.15).

Grație acestor diferențe mari de presiune, deplasarea sângelui cu viteze și debite variabile se realizează din teritoriile vasculare cu presiuni ridicate spre cele cu presiuni joase, respectiv de la ventriculul stâng la atrul drept în cazul circulației sistemice și de la ventriculul drept la atrul stâng în cazul miciei circulației, pulmonare.

Așadar, factorii care afectează presiunea arterială prin intermediul pompei cardiace sunt multipli, începând cu forța și frecvența de contracție a inimii și sfârșind cu întoarcerea venoasă și calitatea peretelui vascular.

Rezistența conductelor vasculare reprezintă cel de al doilea factor determinant al presiunii arteriale. Depinzând de diametrul vaselor și de elasticitatea și vasomotricitatea acestora, forța oponentă a aortei și vaselor mari este neglijabilă. Rezistența crește considerabil la nivelul arterelor terminale, arteriolelor și, într-o măsură mai mică, în capilare și venule. Ansamblul acestora constituie vasele de rezistență. Cea mai mare rezistență la flux o prezintă însă regiunea precapilară, cu lumen arteriolar mic și perete muscular bine reprezentat (fig. 7.16).

Aceasta conferă aproape 50% din rezistența întregului arbore vascular, datorită suprafeței mari de contact și vasomotricității intense, întreținută pe cale neuro-umorală multiplă. Orice modificare a tonusului arteriolar va determina variații ale irigației sanguine locale cu răsunet tensional adeseori general. În cazul unei vasoconstricții arteriolare de natură simpatică, de exemplu, presiunea sanguină va prezenta valori mai ridicate în segmentul vascular dinaintea locului de îngustare a vaselor, ca urmare a reducerii patului vascular general, și un nivel mai scăzut dedesubtul acestuia. Fenomenul invers, de scădere a presiunii sanguine, va apărea în condițiile reducerii rezistenței periferice arteriolare, determinate de diminuarea tonusului simpatic. Concomitent cu tendința la hipertensiune sau hipotensiune, în primul caz se vor produce tulburări ale irigației periferice de tip ischemic, iar în cel de al doilea caz, vasodilatație arteriolo-capilară (fig. 7.17).

Lichidul circulant din arborele vascular este cel de al treilea factor determinant al presiunii arteriale. El participă la realizarea și menținerea presiunii arteriale în limite normale pe două căi principale: prima este reprezentată de masa sanguină circulantă, iar cea de a doua, de către vâscozitatea sângelui. De masa sanguină circulantă depind atât încărcarea patului vascular, cât și întoarcerea venoasă, umplerea diastolică și volumul sistolic, care, în funcție de frecvență, asigură debitul cardiac normal sau patologic. Creșterea volumului circulant din cazul retenției sau ingestiei mari de lichide predispuce la hipertensiune arterială, iar scăderea masei sanguine prin hemoragii atrage după sine tendința la prăbușire a presiunii arteriale.

Implicațiile presionale ale vâscozității sângelui ca factor sanguin de modificare a rezistenței vasculare periferice au fost menționate anterior. Procesul de fricțiune dintre elementele seriei roșii ale sângelui și pereții arterelor contribuie la realizarea forței oponente și rezistenței crescute la flux din teritoriul vaselor de calibr mic, cu consecințe importante asupra presiunii sanguine generale. Ca exemplu poate fi reamintită tendința la hipertensiune a subiecților cu poliglobulie hipoxică de cauză normală (altitudine) sau patologică.

7.3.2.2. Metode de determinare a presiunii arteriale

Atât presiunea sanguină sistolică, cât și cea diastolică sunt ușor de determinat fie prin metode directe, fie cu ajutorul metodelor indirecte.

Metodele directe (intra vasculare) necesită introducerea unei canule sau cateter în arteră, venă sau

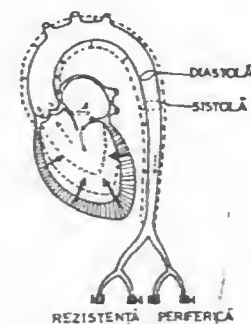


Fig. 7.16. Rezistența la flux a arborelui vascular arterial.

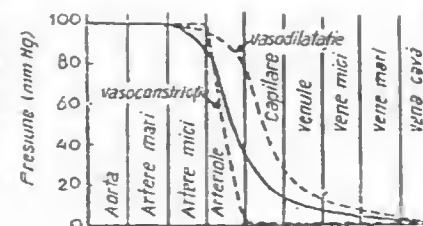


Fig. 7.17. Efectele vasoconstricției și vasodilatației asupra variațiilor presiunii în diferite segmente vasculare.

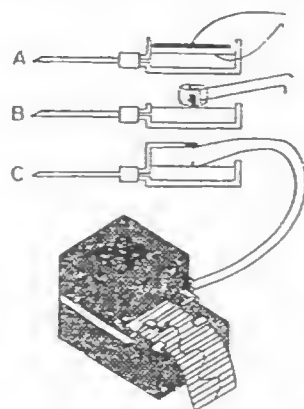


Fig. 7.18. Traductoare electronice de înregistrare a presiunii sanguine.

inimă și conectarea acesteia la un sistem de măsurare și înregistrare a presiunii sistolo-diastolice.

Acest sistem poate fi clasicul manometru cu mercur prevăzut cu flotor în vederea înregistrării sângerânde a presiunii sanguine sau a unuia din cele trei principale tipuri de traductori electronici de înregistrare rapidă a variațiilor presionale sistolo-diastolice (fig. 7.18). Având la bază modificarea capacității (A), inductanței (B) sau rezistenței (C) unei fine membrane metalice plasate în circuit, traductoarele respective convertesc presiunea coloanei de sânge în semnal electric, care se înregistrează apoi pe hârtie fotosensibilă sau cu cerneală. Folosirea traductoarelor electronice evită inerția manometrelor cu mercur, permițând înregistrarea fidelă a variațiilor presionale de foarte scurtă durată (de peste 100 de cicluri pe secundă). Unul din cele mai cunoscute traductoare utilizate la înregistrarea presiunilor vasculare sau intracavitare este elementul Statham.

Înregistrarea presiunii arteriale cu oricare din metodele sângerânde evidențiază trei tipuri de unde pe curba presională:

- oscilații de ordinul I, de origine cardiacă, determinate de expansiunea ritmică a pereților arteriali produsă de activitatea pulsatilă a inimii;

- oscilații de ordinul II, sau de tip respirator, caracterizate prin tendința la creștere a undelor cardiace sistolo-diastolice în timpul inspirației, urmată de revenire la nivelul inițial în expir.

Frecvența oscilațiilor de origine respiratorie este aceeași cu respirației, de 12–16 cicluri pe minut în condiții de repaus și se datorește relațiilor intercentrale bulbare de vechiătate dintre centrii respiratori și cardioacceleratorii;

- oscilații de ordinul III, sau vasomotorii, descrise de Traube-Hering-Meyer, cu frecvență mult mai joasă, doar de 2–3 pe minut. La baza undelor vasomotorii stau variații ale excitabilității centrilor vasomotorii din bulb, cu rol important în menținerea tonusului vascular normal. Amplitudinea lor crește în cazurile de ischemie a centrilor vasomotorii și diminuează odată cu ameliorarea suferinței nervoase centrale provocate de deficitul de oxigen, substanțe otrăvitoare etc. Durata undelor vasomotorii este de cel puțin 10 s, iar intervalul dintre acestea variază în jurul a 25 s.

Metodele indirecte, utilizate curent în practica medicală, au la bază principiul realizării forței opozante cu valoare cunoscută, cu ajutorul unei manșete pneumatice, forță necesară colabării vasului respectiv și scăderii progresive a acesteia până la apariția undelor pulsatile sistolo-diastolice.

Valoarea presiunii cu care sângele circulă în sistemul arterial se poate aprecia palpatoriu, ascultatoriu sau oscilometric.

Metoda palpatorie, introdusă de Riva-Rocci (1897), permite măsurarea numai a presiunii sistolice prin perceperea pulsului la una din arterele situate sub locul de aplicare a manșetei. Fiind limitată la semnalul pulsatil sistolic, metoda prezintă dezavantajul că nu oferă informații asupra valorilor presiunii diastolice.

Metoda ascultatorie, introdusă de Korotkoff (1905) și perfecționată de Vaquez-Laubry, asigură determinarea atât a presiunii sistolice, cât și a celei diastolice, în funcție de caracteristicile zgomotului ce pot fi percepute cu ajutorul unui stetoscop plasat sub manșeta pneumatică la nivelul brațului. Acestea se datoresc scurgerii turbulente de sub manșetă, unde lumenul arterei este mai mic. Primul zgomot fin apărut în timpul decompresiei progresive a manșetei, denumit de Korotkoff ton arterial, corespunde presiunii sistolice (maxime), care, depășind forța opozantă din manșetă, forțează sângele să se deplaseze prin regiunea comprimată. Pe măsură ce presiunea din manșetă se reduce, primul zgomot devine tot mai puternic, suflant, pentru ca apoi să scadă în intensitate până la dispariție. Uneori, tonul arterial inițial este urmat de un „gol” ascultatoriu, după care continuă zgomotul suflant vibratoriu de intensitate descrescând.

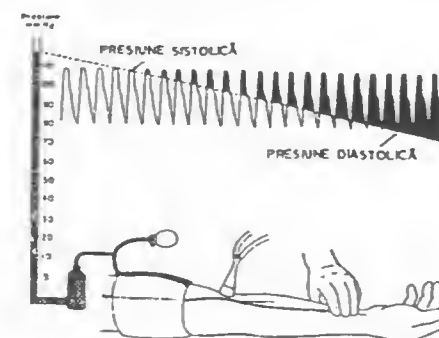


Fig. 7.19. Măsurarea sfigmomanometrică a presiunii arteriale cu metoda palpatorie și cea ascultatorie.

Presiunea diastolică corespunde presiunii din manșetă, atinsă în momentul în care intensitatea zgomotului a scăzut brusc, devenind slab și asurzit (fig. 7.19).

Citirea presiunilor constatate se face pe sfigmomanometrul cu Hg sau cu capsulă aneroidă (cu cadran), conectat la manșeta pneumatică. Expriarea valorilor obținute este de regulă în mmHg sau kPa (kilopascali). La 1 mmHg corespund 0.133 kPa. Presiunea sistolo-diastolică de 120/70 mmHg este egală cu 16/9.3 kPa. Unei presiuni sistolo-diastolice de 140/90 mmHg îi corespund 19/12 kPa. Aparatele moderne de măsurare a presiunii arteriale cu metoda ascultatorie, deși au crescut considerabil acuratețea metodei, determinarea impune unele măsuri de precauție, cum sunt poziția atât culcat, cât și în picioare a subiectului, brațul relaxat, la nivelul cordului, repetarea de cel puțin două ori a determinării în fiecare poziție etc.

Metoda oscilometrică, imaginată de Pachon, se bazează pe observația făcută anterior de Marey că pulsul arterial prezintă oscilații maxime la presiunea medie. Cum debitul de scurgere a sângelui depinde de nivelul presiunii mijlocii, metoda oscilometrică prezintă avantajul că oferă informații și asupra fluxului sanguin din teritoriul vascular respectiv. Spre deosebire de metoda ascultatorie, care permite determinarea presiunilor sistolice și diastolice, metoda oscilometrică oferă indicații și asupra presiunii medii, denumită și indice oscilometric.

Oscilometrul conceput de Pachon, fiind prevăzut atât cu un manometru de măsurare a presiunii realizate în manșetă, cât și cu o capsulă aneroidă ce indică în paralel amplitudinea oscilațiilor sistolo-diastolice, dă posibilitatea determinării presiunilor sistolice, diastolice și medii în funcție de amplitudinea acestor oscilații. Când timp presiunea de colabare din manșetă depășește presiunea sistolică a vasului subiacent, acul oscilometrului nu înregistrează nici un fel de oscilații. Primele oscilații de mică amplitudine sunt urmate de creșterea bruscă a acestora, corespunzând presiunii sistolice. Ele ating o amplitudine maximă de 85–100 mmHg corespunzătoare presiunii medii, sau indicelui oscilometric. Reducerea acestuia este semn de irigație deficitară, cu valoare diagnostică, terapeutică și prognostică deosebită în arterite, gangrenă etc. Oscilațiile maxime continuă cu unde sistolice.

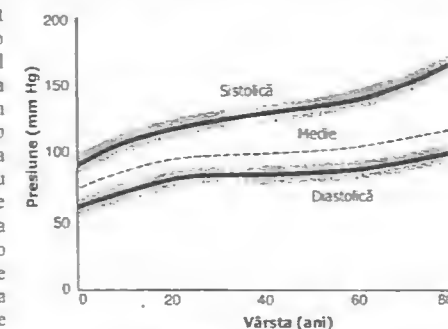


Fig. 7.20. Variații ale presiunii normale sistolo-diastolice și medii în funcție de vârstă.

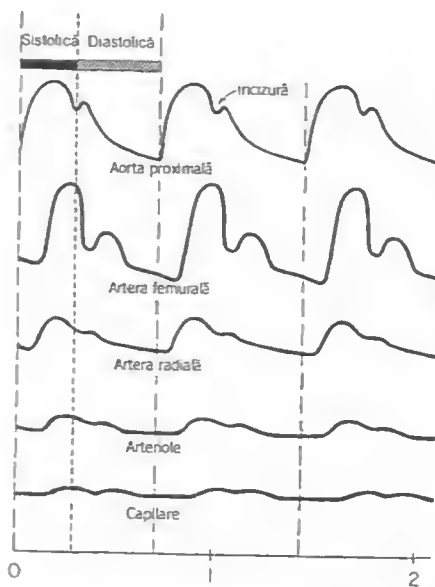


Fig. 7.21. Variații ale presiunii pulsului în funcție de diametrul vasului.

diastolice de amplitudine descrescândă, a căror scădere bruscă corespunde presiunii diastolice (fig. 7.20).

În felul acesta, metoda oscilometrică permite determinarea nu numai a valorilor presiunilor sistolo-diastolice, ci și stabilirea indicelui oscilometric, ca mijloc de investigație a circulației periferice.

Înregistrări continue oesângerânde se pot realiza cu ajutorul metodei tensio-oscilografice (fig. 7.21).

Acestea utilizează traductoare pneumo-electrice sau piezoelectrice, cuplate cu înregistratoare de oscilație și presiune.

În ultimii ani, se folosesc traductoare multiple prevăzute cu sisteme de amplificare și printr pe calculator controlate de microprocesor. Cu ajutorul acestora se pot urmări simultan 4 sau chiar 6 parametri biologici (presiune sanguină, frecvența cardiacă, temperatură, frecvența respirației, CO_2 , etc.) la subiecții monitorizați. Un asemenea sistem de monitorizare a ECG, frecvenței cardiace și presiunii arteriale sistolo-diastolice este prezentat în figura următoare (fig. 7.22).

7.3.2.3. Tipuri de presiune arterială

La nivelul arterelor mari și mijlocii, presiunea arterială prezintă două componente:

- una constantă, dedesubtul căreia presiunea nu coboară și care definește presiunea minimă din timpul diastolei generale;
- una variabilă, care ridică presiunea la o valoare maximală în timpul sistolei ventriculare.

După cum este măsurată în sistolă sau diastolă, se obține presiunea sanguină sistolică și presiunea diastolică.

Presiunea sistolică (maximă) este presiunea cu care sângele este propulsat în sistemul vascular arterial în timpul sistolei ventriculare. În sectorul arterial al marii circulații, valorile acesteia la adult ating 120-140 mmHg, în cazul arterelor mari și mijlocii, pentru ca, la nivelul arterelor mici (metatarsiene, de exemplu), presiunea sistolică să coboare la 70-80 mmHg, iar în teritoriul capilar arterial să ajungă la 30-35 mmHg. Faptul se datorește, după cum s-a văzut, rezistenței mari a teritoriului arteriolar, la nivelul căruia debitul pulsatil arterial este transformat în scurgere continuă capilară.

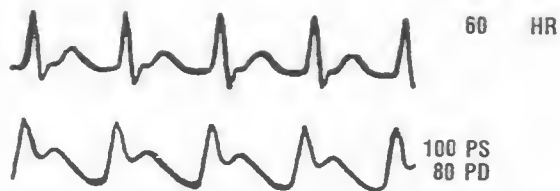


Fig. 7.22. Monitorizarea ECG și a presiunii arteriale sistolo-diastolice.

Presiunea diastolică (minimă) este presiunea cu care sângele conține să se deplaseze în arborele vascular arterial în timpul diastolei ventriculare. Valorile sale oormale, reprezentând jumătate din valoarea presiunii sistolice plus unu, se datoresc închiderii valvulelor sigmoide la sfârșitul sistolei ventriculare și împiedicării tendinței la refluxare a sângelui din aortă spre ventriculul stâng în timpul diastolei. În felul acesta se realizează evitarea prăbușirii presiunii diastolice și fixarea sa în jurul valorilor normale de 70-90 mmHg.

Spre deosebire de presiunea sistolo-diastolică cu care sângele circulă în marea circulație, regimul presional al miciei circulații reprezintă doar a 5-a parte din valorile normale ale acesteia. În timp ce presiunea sistolică în artera pulmonară este de 25-28 mmHg, presiunea diastolică nu depășește 8-10 mmHg.

Presiunea medie reprezintă media presiunilor sistolică și diastolică, cu o valoare ceva mai apropiată de minimă decât de maximă. Mai exact, presiunea arterială medie variază între 95 și 100 mmHg. Ea se calculează adăugând o treime din valoarea presiunii diferențiale (sistolo-diastolice) la cifra presiunii minime.

Cu alte cuvinte, presiunea arterială medie este o medie ponderată a presiunii sistolice (P_s) și diastolice (P_d), de forma $(2P_s + P_d)/3$, deoarece în cursul ciclului cardiac presiunea arterială este egală cu cea diastolică sau apropiată de aceasta pentru o perioadă aproape dublă față de cea în care se găsește la valori mari, sistolice.

Presiunea medie, constituind fondul presional permanent de propulsie și irigare a sângelui de la inimă spre țesuturi, asigură irigația și nutriția tisulară. La vârstnici, odată cu reducerea elasticității vasculare, presiunea arterială medie are tendință la creștere și apropiere de valorile maxime.

Presiunea diferențială este reprezentată de diferența dintre presiunea sistolică și cea diastolică. În condiții normale, aceasta are o valoare de aproximativ 45-50 mmHg. Reflectând variațiile presiunilor sistolo-diastolice, se mai numește și **pulsul presiunii**. Cooțrar vitezei de deplasare a sângelui, care scade progresiv în teritoriul arterelor de calibr mic, pulsul presiunii rămâne la un nivel suficient de ridicat. Grație ioterveoției valvulelor aortice, elasticității arteriale și rezistenței periferice, presiunea se menține ridicată la începutul sistolei următoare.

După cum presiunea diferențială are tendință la scădere sau creștere pe seama apropierii sau depărtării valorilor minime de ale maximei, presiunea arterială poate fi de tip convergent sau divergent.

Presiunea convergentă este presiunea arterială cu minima crescută pe fondul unei maxime normale. În acest caz, presiunea minimă, depășind $1/2+1$ din valoarea maximei, va fi mai apropiată de presiunea sistolică. Asemenea situații se întâlnesc la persoanele surmenate, cu fenomene de simpattonie constituțională sau la pacienții cu boli de rinichi, al căror tonus vascular este crescut datorită hiperactivității sistemului renin-angiotensină.

Presiunea divergentă se caracterizează prin tendința la scădere a presiunii minime, diastolice, cu menținerea presiunii sistolice în limite normale. Fenomenul se întâlnește fie la sportivi vagotoni bine antrenati, fie la pacienții cu insuficiență aortică. În ambele cazuri, presiunea diferențială crește ca urmare a coborârii minime sub valorile normale, în timp ce maxima rămâne practic nemodificată.

Presiunea exercitată de masa sanguină asupra pereților ou coboară la zero nici după oprirea cordului și dispariția oscilațiilor sistolo-diastolice, ci rămâne ușor pozitivă, datorită unui oarecare grad de supraîncărcare a patului bazal.

7.3.2.4. Manifestări periferice ale presiunii arteriale

În afara fenomenelor presionale centrale de la nivelul pompei cardiace și arterelor mari și mijlocii, un interes teoretic și practic deosebit prezintă manifestările periferice ale presiunii sanguine. Acestea sunt reprezentate de pulsul arterial și de pulsul total sau volumetric.

Pulsul arterial constă în distensia pereților arteriali din timpul sistolei ventriculare, determinată de creșterea presiunii și diametrului arterei comprimate pe un plan osos. Expansiunea ritmică a arterelor

periferice se datorește propagării cu viteză mare a unei vibrații vasculare produse de expulzia sângelui sub presiune din inimă în vasele mari. Spre deosebire de viteza de deplasare a sângelui, care atinge în timpul sistolei ventriculare doar 0,4–0,5 m/s, unda pulsatilă arterială se propagă cu viteze de 4–6 m/s. Viteza undei pulsatile depinde de elasticitatea sistemului arterial.

Factorii care determină pulsul arterial țin de volumul bătaie al cordului și de complianța (distensibilitatea totală) a arterelor. Cu cât va fi mai crescut volumul sistolic, cu atât cantitatea de sânge propulsată în artere la fiecare bătaie va fi mai mare și, astfel, oscilațiile pulsatile sistolo-diastolice vor fi mai ample. Pe de altă parte, cu cât complianța sistemului arterial va fi mai mare, cu atât presiunea pulsatilă determinată de volumul de sânge pompat în artere va fi mai mică. În ultimă instanță, orice alterare circulatorie care afectează unul din acești doi factori (volum sistolic și complianță arterială) modifică și pulsul arterial sau presiunea pulsului (după autorii anglo-saxoni).

Dintre factorii modificatori ai volumului sistolic fac parte caracterul ejecției din cord, creșterea ritmului cardiac, scăderea rezistenței periferice și variațiile întoarcerii venoase. Ejecția rapidă, de exemplu, va determina o presiune a pulsului mai mare decât ejecția prelungită. La rândul său, creșterea frecvenței cardiace în condițiile unui debit cardiac constant va avea drept urmare scăderea volumului sistolic și a presiunii pulsului. În sfârșit, reducerea rezistenței periferice, permițând trecerea mai rapidă a sângelui din artere în vene, va determina, ca și creșterea întoarcerii venoase, o amplificare a presiunii pulsului.

În contrast cu multitudinea factorilor care pot modifica volumul sistolic, complianța vasculară este afectată numai în cazurile de alterare a distensibilității peretelui arterial la vârstnici și aterosclerotici în general.

Caracterele (calitățile) pulsului arterial pot fi apreciate palpatoriu sau înregistrate cu ajutorul sfigmografelor de diverse tipuri (pneumatice, manometrice, transductoare electromecanice, fotoelectrice etc.).

Prin simpla palpate a unei pulsatile de la nivelul unei artere superficiale se pot obține o serie de informații asupra stării normale sau patologice a sistemului cardio-vascular, în funcție de frecvență, ritm, amplitudine, duritate și intensitate.

Frecvența și ritmul regulat sau neregulat dau indicații asupra activității cardiace. Amplitudinea și duritatea, pe de altă parte, sunt direct proporționale atât cu forța de contracție a miocardului și ejecția sângelui din cord, cât și cu elasticitatea vasculară. Persoanele cu tonus vascular crescut, ca și cele aterosclerotice, prezintă pulsul mai amplu și mai dur. Vasomotricitatea sezonieră se reflectă, de asemenea, asupra amplitudinii pulsului arterial, dând pulsul de iarnă sau de vară. La rândul său, intensitatea depinde mai mult de componenta vasculară decât de cea cardiacă, inclusiv de nivelul presiunii arteriale medii. În timp ce la bolnavii cu insuficiență aortică pulsul arterial este săltăreț și depresibil, la cei cu hemoragii grave devine filiform, abia perceptibil. Înscrisura pulsului arterial poartă numele de sfigmogramă. Sfigmografia poate fi practică la nivelul uneia din arterele mari (subclavie, carotidă) sau mici (radială, pedioasă etc.). În primul caz se va înregistra pulsul central, iar în cel de al doilea, pulsul periferic.

Indiferent de locul de înregistrare a pulsului arterial, sfigmograma va prezenta o linie ascendentă, denumită undă anacrotă, produsă de creșterea bruscă a presiunii, urmată de o pantă descendentă lentă – unda catacrotă, prevăzută cu o incizură, cunoscută sub numele de undă dicrotă. Aceasta marchează blocarea tendinței la refluare a sângelui la sfârșitul sistolei ventriculare prin închiderea valvulelor sigmoide aortice (fig. 7.23).

De remarcat pulsul la pedioasă mai amplu decât în arterele mari, datorită însumării undei reflectate cu componenta pulsatilă directă.

Dicrotismul marcat este, alături de presiunea diferențială mare, semn de insuficiență aortică.

La nivelul capilarelor, pulsul arterial dispare, ca urmare a amortizării undei pulsatile de către vasele de rezistență. Pulsul capilar este totuși prezent în anumite stări patologice, cum sunt: presiunea diferențială mare din insuficiența aortică, dilatația exagerată a arteriolelor, ductul arterial sau ritmul cardiac foarte lent.

Pulsul total, sau volumetric, este reprezentat de variațiile pulsatile sistolo-diastolice de la nivelul unui organ sau segment al corpului. Aceste variații pot fi apreciate în funcție de volumul organului sau

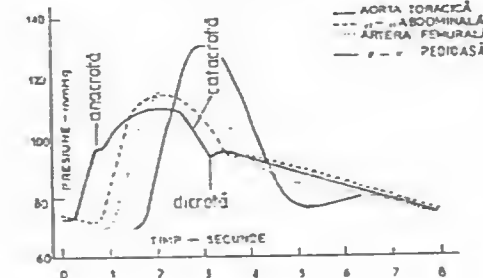


Fig. 7.23. Pulsul arterial la niveluri arteriale diferite.

segmentului respectiv cu ajutorul metodei pletismografice. Pletismografele sunt aparate care permit înregistrarea variațiilor de volum prin intermediul unei coloane de apă sau aer, cuprinsă între pereții rigizi ai acestora și organul respectiv. Variațiile sunt înregistrate cu ajutorul unei penițe inscriptoare sau al traductoarelor electrice, pneumo-electrice, electromecanice etc.

Curba pletismografică prezintă aceleași trei tipuri de unde ca și presiunea sanguină: unde de origine cardiacă, respiratorie și vasomotorie. Excitațiile directe sau reflexe ale teritoriului investigat determină variații ale curbei pletismografice de tip vasoconstrictor sau vasodilatator. Contrar curbei presiunale arteriale, vasoconstricția se va exprima pletismografic prin scăderea curbei, iar vasodilatația prin creșterea acesteia, ca urmare a modificărilor de volum ale organului respectiv (fig. 7.24).

În afara testării reactivității vasculare, înregistrările pletismografice pot fi folosite ca metodă de apreciere a debitului sanguin dintr-un membru sau segment al acestuia. Dacă se blochează întoarcerea venoasă cu ajutorul unei manșete pneumatice plasate la rădăcina membrului sau segmentului luat în studiu, teritoriul subiacent își crește volumul, întrucât sângele continuă să treacă din artere în vene atât timp cât presiunea din manșetă este inferioară presiunii arteriale diastolice. Analiza curbei pletismografice permite să se calculeze debitul sanguin arterial în segmentul de membru explorat.

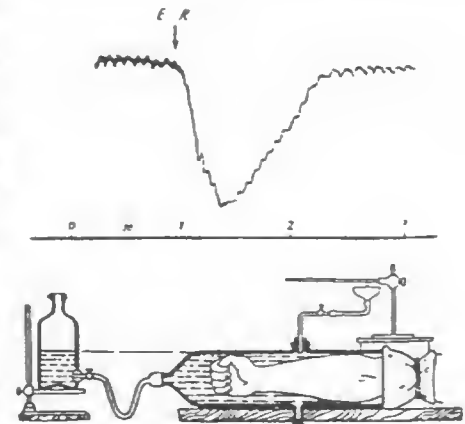


Fig. 7.24. Înregistrare pletismografică înainte și în timpul testului „la rece” (ER).

7.3.2.5. Variațiile presiunii arteriale

Deși presiunea cu care sângele circulă în arborele vascular arterial se menține în limite constante, ea poate prezenta variații în plus sau minus, fie normale, fie patologice.

Dintre variațiile normale fac parte variațiile determinate de vârstă, activitate sau repaus, poziția corpului, factori de mediu (temperatură, presiune etc.).

La naștere, presiunea sanguină este doar de 55–60/40 mmHg, valori incompatibile cu viața, la adult. La un an, tensiunea arterială este deja 80–85/60 mmHg, pentru a crește progresiv până la pubertate, când atinge valoarea medie de 120/80 mmHg, egală cu cea de la adult. După 50 de ani apare tendința la creștere și fixare a acestor valori la limita superioară de 140–145/90–95 mmHg. Datorită reducerii elasticității, minima poate crește la bătrâni într-o măsură mai mare decât maxima.

Starea de repaus și de activitate este, de asemenea, un factor de variație a presiunii sanguine. Efortul fizic predispune la creșterea presiunii arteriale prin mecanismul măririi debitului cardiac, ca urmare a tahicardiei și activării întoarcerii venoase de către contracția musculaturii striate. Răspunsul presor la efort diferă, după cum este vorba de persoane antrenate sau neantrenate. În timp ce subiecții antrenati reacționează prin tahicardie și hipertensiune moderată, cei neantrenati prezintă de regulă răspunsuri cardio-vasculare brutale la efort. Datorită suprasolicitării cordului, aceștia din urmă pot prezenta fenomene de colaps cardiac sau cîbîr edem pulmonar acut. Efortul fizic determină creșterea debitului cardiac pe seama volumului bătăie la persoanele antrenate și a tahicardiei la cele neantrenate. Modificările cardio-vasculare din efort sunt prezentate în fig. 7.25.

Simpla modificare a poziției corpului este capabilă să producă uneori variații decelabile ale presiunii sanguine. Poziția ortostatică predispune la hipotensiune și ischemia centrilor, datorită tendinței la cădere a sîngelui în jumătatea inferioară a corpului. Așezarea subiectului în poziție clinostatică restabilește echilibrul hemocirculator, ulburat de ortostatism (fig. 7.26).

În mod normal, tendința la hipotensiune ortostatică este contracarată de reacțiile reflexe simpatice vasoconstrictoare din segmentul inferior, care, opunându-se sustragerii prin cădere și stază a unei părți din masa sanguină, asigură irigarea satisfăcătoare a restului organismului, inclusiv a teritoriului nervos cefalic. Interesantă din acest punct de vedere este proba ortostatismului și atropinei, introdusă de Danielopolu: scăderea presiunii sanguine și tahicardia din momentul trecerii de la clinostatism la ortostatism este mai intensă la vagotonici decât la simpatotonici și necesită o cantitate mai mare de atropină pentru a fi contracarate (peste 2 mg atropină). Reacții inverse, de tip presor, apar la simpatotonici, fiind intensificate de atropină.

Factorii de mediu, temperatura, stresul emoțional etc. produc, de asemenea, variații tranzitorii ale presiunii sanguine. Spre deosebire de frig, care provoacă vasoconstricție și tendință la hipertensiune, căldura predispune la vasodilatație și hipotensiune. Stresul emoțional și reacțiile de furie sau agresivitate se însoțesc de fenomene de predominanță simpatică, de tip tahicardizant și vasoconstrictor.

Creșteri patologice ale presiunii sanguine se întîlnesc în hipertiroidie, feocromocitom, hipertensiune arterială esențială și reno-vasculară etc.

Scăderea presiunii sanguine poate apărea în hemoragii, anemii și insuficiența corticosuprarenală prin reducerea masei lichidice circulante, precum și în insuficiența cardiacă, hipotensiune ortostatică, șoc și colaps, ca urmare a alterării funcției contractile a inimii sau vasomotorii a sistemului tensio-reglator. Atît staza retrogradă din insuficiența cardiacă, cît și exoplasmia din șoc sustrag din circulație importante cantități de masă sanguină, care duc, în final, ca și în cazul hipotensiunii ortostatice, la scăderea presiunii arteriale.

7.3.3. REGLAREA PRESIUNII ARTERIALE

Starea de echilibru și stabilitate autoîntreținută a presiunii sanguine, denumită homeostazie circulatorie, se realizează și se menține în limite normale cu ajutorul sistemului tensio-reglator prin mecanisme neuro-umorale generale și locale. Termenul homeostazie, introdus de Cannon (1930) pentru a sublinia inițial constanța mediului intern – semnalată încă din secolul trecut de Cl. Bernard (1858), a fost extins ulterior la toate funcțiile organismului care beneficiază de mecanisme de autoreglare și control, capabile să asigure stabilitatea și menținerea funcției respective în limite mai mult sau mai puțin constante.

În cazul homeostaziei circulatorii, aceasta este consecința autoreglării cardio-vasculare pe cale dublă, nervoasă și umorală. În timp ce componenta nervoasă realizează reglarea de scurtă durată a circulației, componenta umorală prelungește în timp efectele acesteia, asigurând reglarea de lungă durată.

Excitantul fiziologic al reglării neuro-umorale a circulației, în general, și presiunii sanguine, în particular, este reprezentat de nivelul însuși al tensiunii arteriale, pe de o parte, și de constituenții plasmiei, pe de altă parte.

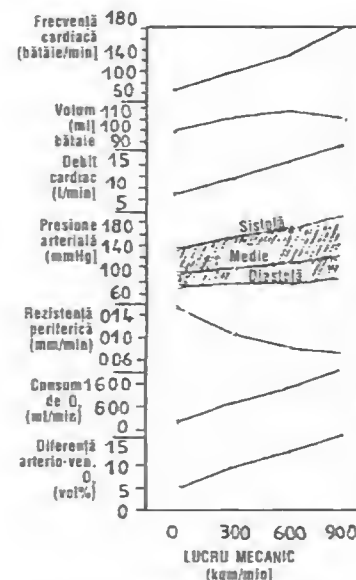


Fig. 7.25. Modificări cardio-vasculare produse de efortul fizic.

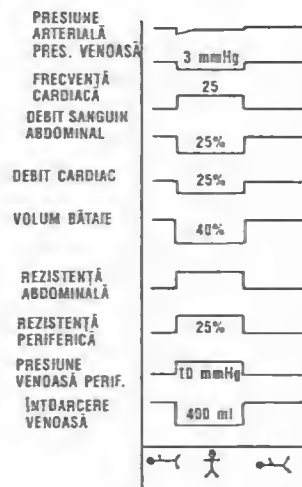


Fig. 7.26. Reacții cardio-vasculare în clinostatism și ortostatism.

Deși Morat semnalase încă din 1898 că: „presiunea reglează presiunea”, mecanismul tensio-reglator prin care se realizează această autoreglare a fost stabilit de abia după descoperirea zonelor reflexogene sino-carotidiană (Heymans, 1933) și endocardio-aortică (Comroe, 1939).

7.3.3.1. Reglarea nervoasă

Reglarea nervoasă asigură pe cale reflexă restabilirea promptă a dezechilibrelor hemodinamice create, constituind primul mijloc de apărare contra pericolului de dereglare circulatorie. Reacțiile cardio-vasculare rezultate se produc cu participarea obligatorie a zonelor reflexogene, căilor aferente, centrilor neuro-reflecși bulbari și a inervației aferente simpatico-parasimpatice, care guvernează activitatea organelor efectoare, reprezentate de mușchiul cardiac și arborele vascular.

a) **Zonele reflexogene sino-carotidiană și endocardio-aortică** sunt structuri neuro-vasculare, bogate în țesut elastic și elemente nervoase presoro- și chemosensibile, cu sensibilitate maximă la variațiile de presiune, înțindere sau compoziție chimică a sîngelui circulant, situate la nivelul vaselor mari de la baza inimii și gâtului. În afara zonelor reflexogene clasice, există un număr suficient de alte structuri diferențiate histo-fiziologic, sensibile la variațiile de presiune și compoziție chimică a sîngelui, cum sunt cele de la nivelul auriculelor, ventriculului stîng, arterei mezentenice superioare, globului ocular, aparatului vestibular, arterelor vertebrale, joncțiunii tiro-carotidiene etc.

Rolul cel mai important în reglarea fiziologică a activității cardio-vasculare revine însă presoreceptorilor și chemoreceptorilor de la nivelul sinusului carotidian și regiunii endocardio-aortice, care

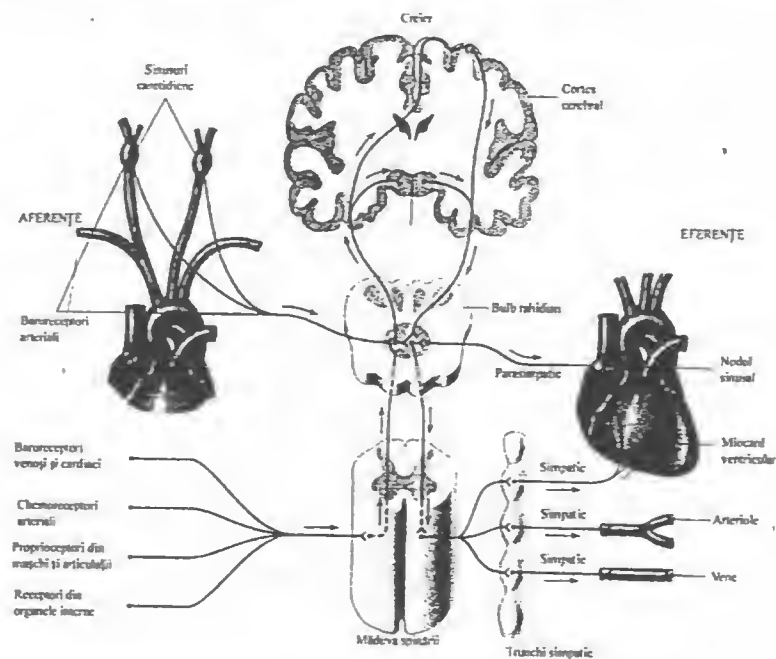


Fig. 7.27. Circuite nervoase majore implicate în controlul funcției cardio-vasculare.

indeplinesc rol de traductori ai variațiilor de presiune și compoziție chimică a sângelui în influx nervos (fig. 7.27).

Sub influența impulsurilor nervoase provocate de stimularea fizică sau chimică a acestor zone apar reacțiile cardiovasculare compensatorii, de sens invers celor care le-au generat, în vederea restabilirii rapide a echilibrului hemocirculator. În general, presoreceptorii (baroreceptorii) sino-carotidieni și endocardio-aortici acționează în sens inhibitor asupra centrilor vasomotori din bulb. Excitarea lor, indusă de creșterea presiunii sanguine peste valorile normale, deprimă centrii vasomotori și cardiaci bulbari, determinând vasodilatație periferică, bradicardie și diminuarea forței de contracție a inimii. Scăderea presiunii arteriale sub limite normale, reducând influența inhibitoare a zonelor reflexogene asupra centrilor cardio-vasculari din bulb, va determina, din contră, creșterea presiunii sistemice. Reacțiile cardio-vasculare compensatoare produse de distensia în plus sau în minus a celor două zone reflexogene ilustrează funcția tampon a acestora.

Astfel, chiar fluctuațiile sistolo-diastolice sunt puternic tamponate, fapt demonstrat de efectul secționării aferențelor respective la câine, anume trecerea de la variațiile normale, între 85 și 115 mmHg, la diferențe sistolo-diastolice mai mult decât triple, între 50 și 160 mmHg. Frecvența de descărcare a impulsurilor din baroreceptori este zero dacă presiunea arterială este sub 60 mmHg și maximă la ~180 mmHg, se modifică la variații rapide ale presiunii arteriale (sistolo-diastolice; posturale) și depinde de sensul și viteza de variație a presiunii arteriale. Baroreceptorii sunt un exemplu tipic de receptori cu adaptare rapidă și completă (resetare), astfel că acest mecanism de control nu poate fi utilizat decât la reglarea pe termen

foarte scurt a presiunii arteriale. Altfel spus, activitatea în arcul reflex baroreceptor depinde mai mult de modificarea presiunii arteriale și de viteza acestei modificări decât de valoarea absolută presională.

Pentru o modificare presională similară, descărcarea baroreceptorilor se poate dubla în cazul creșterii presiunii, dar se reduce de cinci ori dacă presiunea scade. Acest aspect reliefează faptul că reflexul baroreceptor funcționează preferențial pentru a contracara căderile de presiune.

Pentru reflexul chemoreceptor, receptorii sunt reprezentați de celule chemosensibile din corpusculul carotidian și din formațiuni similare aortice. Terminațiile senzitive de la nivelul chemoreceptorilor descarcă la valori ale presiunii arteriale mai mici de 80 mmHg. Călea aferentă este similară cu cea pentru reflexul baroreceptor. Aceste formațiuni cu vascularizație deosebit de intensă răspund la scăderea O_2 și la creșterea CO_2 și H^+ , fiind mai importante în controlul respirației. În controlul funcției cardio-vasculare activarea acestui reflex determină vasoconstricție și bradicardie, dar rezultatul final este tahicardia, datorită fenomenului de hiperpnee de cauză hipoxică și ca urmare a creșterii secreției de catecolamine din medulosuprarenală. Reflexul chemoreceptor ar putea fi implicat în undele Mayer (25–50 mHz), observate în hipotensiune.

b) Căile aferente, de legătură a zonelor receptoare sino-carotidiană și endocardio-aortică cu centrii vegetativi bulbari, sunt reprezentate de nervii depresori (frenatori), descriși de Hering (1924) și Ludwig-Cyon (1867). Primul, denumit și nervul carotidian, aparține glosofaringianului, iar cel de al doilea este ram senzitiv al pneumogastricului (vezi fig. 7.27). În timp ce secționarea chirurgicală a acestora provoacă binecunoscuta hipertensiune neurogenă de defrenare, excitarea electrică a capătului lor central determină bradicardie și hipotensiune arterială. Aceste fapte experimentale, fiind confirmate de înregistrările descărcărilor electrice ale nervilor frenatori din timpul creșterii și scăderii presiunii de perfuzie a sinusului carotidian izolat, demonstrează rolul fiziologic inhibitor al zonelor reflexogene și căilor aferente respective asupra centrilor vasomotori. Înlocuirea sinusului carotidian cu un pace-maker emițător de salve neuro-reflexe inhibitoare a dus, de altfel, la obținerea unor rezultate promițătoare în tratamentul hipertensiunii arteriale esențiale.

La nivelul auriculului drept se găsesc, de asemenea, receptori sensibili la variațiile de presiune și întindere a fibrelor musculare auriculare, a căror stimulare provoacă tahicardie reflexă. Efectul tahicardizant al distensiei auriculare, cunoscut sub numele de reflex Bainbridge, se datorește inhibării nucleului dorsal al vagului de către impulsurile nervoase plecate de la nivelul acestor receptori pe cale vagală și apare ca mijloc de apărare a cordului față de supraîncărcarea auriculului drept.

Controlul atrial al frecvenței cardiace (Bainbridge) include o componentă directă locală, reprezentată de întinderea nodulului sinusal (ce permite creșterea frecvenței cu 15%) și o componentă reflexă (ce poate crește frecvența cu încă 50%), care este mai slabă la frecvență cardiacă mare.

La rândul său, distensia auriculului stâng provoacă pe cale aferentă vagală diureză reflexă prin inhibarea secreției de hormon antidiuretic, în vederea eliminării excesului de apă și descărcării patului vascular (fig. 7.28).

În afara receptorilor arteriali și auriculari, un rol mai puțin fiziologic și predominant patologic îl au reflexele cardio-vasculare cu punct de plecare ventricular. Stimulii nocivi fizici și chimici aplicați asupra ventriculului stâng, de exemplu, produc reacții neuro-reflexe hipotensoare. Injectarea de substanțe iritante în circulația coronariană, ca și obstruarea acesteia cu sfere de sticlă sau plastic sunt urmate de prăbușirea presiunii sanguine. Fenomenul, cunoscut sub denumirea de reflex Bezold-Jarish, pare a fi de o deosebită importanță în producerea colapsului vascular din infarctul miocardic.

Reacții neuro-reflexe de presoare provoacă și stimularea mecanică a receptorilor de la nivelul globilor oculari și aparatului vestibular. Compresia globilor oculari este urmată, la majoritatea subiecților normali, de scăderea frecvenței cardiace (reflexul Aschner-Dagnini).

În afara zonelor reflexogene clasice și a căilor aferente specifice, există așadar numeroase alte teritorii receptoare, a căror stimulare poate induce, prin intermediul căilor nespecifice extero-, inter- sau proprioceptive și al formațiunii reticulate, excitarea sau inhibarea centrilor vasomotori.

c) Centrii reflectivității cardio-vasculare sunt situați în substanța reticulată de la baza creierului, cu sediul bulbo-proteuberanțial.

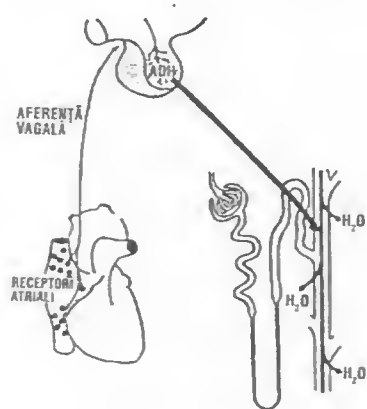


Fig. 7.28. Reflexul atrial inhibitor al secreției de hormon antidiuretic (ADH).

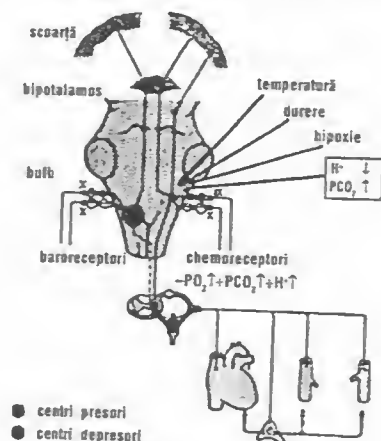


Fig. 7.29. Centri vasomotori, cu principalele lor căi aferente și eferente.

În partea anterioară-laterală a formațiunii reticulată bulbo-protuberanțiale se găsesc centri presori vasoconstrictori și cardioacceleratori, care, acționând cu o frecvență de 1-2 impulsuri descărcate pe secundă asupra sistemului nervos simpatic din măduva spinării, întrețin tonusul bazal al vaselor și, într-o măsură mult mai mică, pe acela al cordului (fig. 7.29).

Stimularea predominantă directă sau reflexă a acestora provoacă, prin intermediul coloanei intermediolaterale simpatice a măduvei toraco-lombare, fenomene de vasoconstricție, tahicardie și de creștere a rezistenței periferice, însoțite de hipertensiune arterială.

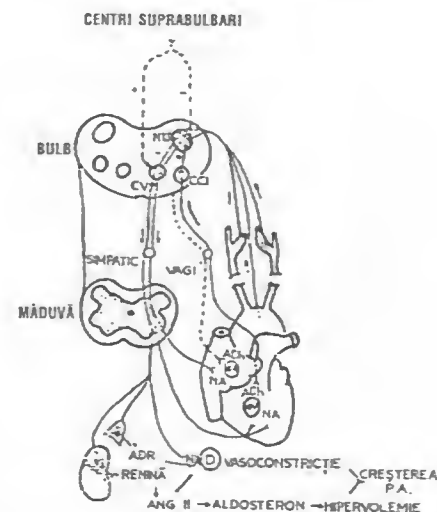
În porțiunea postero-mediană a complexului neuro-reflex bulbar se găsesc centri depresori vasodilatatori și cardioinhibitori, care influențează indirect funcția circulatorie, inhibând centri vasoconstrictori și stimulând nucleul motor dorsal al vagului, prevăzut cu acțiuni cardioinhibitoare. Grație acestor interrelații morfo-funcționale ale centrilor organo-vegetativi bulbari, efectul cardioaccelerator coexistă cu cel cardioinhibitor însoțit de reacții vasodilatatoare.

Înainte de a ajunge la ovelul centrilor vasomotori și al nucleului dorsal al vagului, majoritatea aferențelor vagale fac sinapsă în nucleul tractusului solitar (NTS). Prin intermediul acestuia, aferențele baroreceptoare vagale stimulează centri cardioinhibitori și nucleul dorsal al vagului, paralel cu inhibarea centrilor vasomotori (fig. 7.30).

Distrugerea sa electrolică provoacă creșterea brutală a presiunii arteriale. Centri vasomotori și cardioacceleratori bulbo-protuberanțiali constituie de fapt un tot unitar, cu rol de veritabil barostat, prevăzut cu tonus și automatism propriu, întreținut de variațiile bioxidului de carbon și ionilor de hidrogen din sânge.

Tonusul centrilor reflexi cardio-vasculari este influențat de aferențele sosite atât de la nivelul zonelor reflexogene specifice (baroreceptoare, chemoreceptoare), cât și de la alte teritorii senzoriale (nociceptive, auditive, vizuale etc.) pe calea formațiunii reticulată și este controlat în permanență de centri organo-vegetativi supraîncalzi. Aceștia se găsesc în formațiunea reticulată mezencefalo-diencefalică, hipotalamus, rinencefal și chiar în scoarța cerebrală premotorie. Prin relații intercentrale de diverse tipuri, centri oervoși supraîncalzi pot influența atât în sens excitator, cât și în sens inhibitor activitatea centrilor vasomotori bulbari. Hipotalamusul, în special, joacă un rol important în integrarea și coordonarea circulației prin intermediul centrilor cardio-vasculari din bulb. Porțiunea sa posterioară, bogată în catecolamine și serotonină

Fig. 7.30. Relațiile funcționale ale nucleului tractusului solitar (NTS) cu centrii vasomotori (CVM) și cardioinhibitori (CCI). ACh, acetilcolină. ADR, adrenalină. NA, noradrenalină. AJG, aparat juxtaglomerular. PA, presiune arterială.



(Vogt, 1954), integrează și coordonează activitatea sistemului simpatico-adrenergic, sub raport vasoconstrictor, termogeotetic și ergotrop în general, iar partea anterioară conține centri parasimpatici vasodilatatori, termolitici, digestivi, neurosecretori etc.

Integrând componentele somatice cu cele vegetative, hipotalamusul asigură, în același timp, producerea reacțiilor somato-vegetative adecvate diverselor acte comportamentale (alimentare, sexuale, de agresivitate, apărare etc.).

La rândul său, hipotalamusul este supus influențelor excitatoare și inhibitoare de la nivelul paleocortexului (rinencefalului) și neocortexului cerebral. Complexul rinencefalo-hipotalamic, guvernând prin bucla Papez viața psiho-emoțională, afectează profund activitatea centrilor organo-vegetativi din hipotalamus și, prin intermediul acestora, echilibrul simpatico-parasimpatic cu răsunet cardio-vascular periferic. Pe această cale, emoțiile, starea de anxietate sau furie produc modificări ale ritmului cardiac și de vasomotricitate.

Neocortexul, de asemenea, exercită influențe activatoare și inhibitoare asupra centrilor vasomotori bulbari, cu sau fără participarea hipotalamusului ca verigă intermediară. În timp ce stimularea ariei premotorii (girus sigmoid anterior) provoacă reacții vasoconstrictoare și, odată cu răspunsul contracției musculare, vasodilatație la nivelul musculaturii scheletice în stare de activitate (fig. 7.31).

La sportivi bine antrenați, aceasta poate chiar anticipa contracția musculară. Reacțiile vasomotorii de origine corticală se produc fie pe cale directă cortico-spinală, ca în

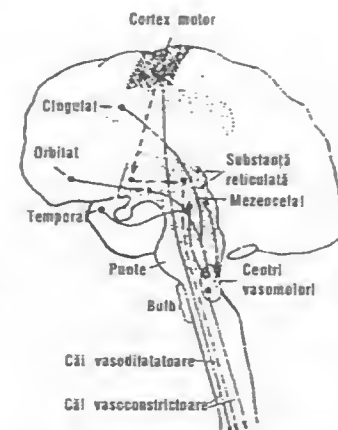


Fig. 7.31. Aii cortico-subcorticale implicate în reglarea nervoasă a circulației.

cazul vasodilației din mușchii scheletici, fie indirect, prin releul hipotalamic și bulbar. De menționat că majoritatea influențelor nervoase centrale se exercită prin intermediul cordoanelor simpatice intermediolaterale și al centrilor vasomotori din măduva spinării.

Șocul spinal, produs de secțiunea măduvei la nivelul lui C₇, demonstrează participarea centrilor vasomotori medulari la menținerea tonusului vascular, în general, și la producerea reacțiilor vasomotorii segmentare, în particular.

Excesul de H⁺ și CO₂, dublat de deficitul de O₂, activează centrii vasomotori, favorizând apariția undelor de ordinul al 3-lea (vasomotorii) pe curba presională sanguină și, în final, creșterea presiunii arteriale. Hiperventilația pulmonară predispozează, din contră, la hipotensiune, ca urmare a scăderii tonusului centrilor vasomotori în lipsa ionilor de hidrogen și CO₂ (apnee). Variațiile de temperatură determină, de asemenea, modificări vasomotorii compensatoare, cu participarea centrilor termoregulatori din hipotalamus. În timp ce scăderea temperaturii ambiante provoacă vasoconstricție prin mecanismul stimulării centrilor termogenetici din hipotalamusul posterior, unde predomină nucleii vegetativi simpatici, creșterea temperaturii produce vasodilație de natură parasimpatică, generată de excitarea centrilor termolitici din hipotalamusul anterior.

Iscemia centrilor organo-vegetativi din trunchiul cerebral, indusă de creșterea presiunii lichidului cefalorahidian, se însoțește, de regulă, de hipertensiune arterială reflexă (*reflexul Cushing*), dublată de unde vasomotorii (Traube-Hering) respiratorii compensatoare.

Deficitul nutritiv al centrului vasomotor (presiune arterială sub 60 mmHg) induce activarea neuronilor vasoconstrictori (maximă la ~20 mmHg; probabil prin acumularea CO₂, oricum prin aciditate) și creșterea marcată a presiunii (250 mmHg pentru 10 min). Acest fenomen reprezintă un mecanism de urgență (exemplu, reacția Cushing la creșterea presiunii LCR până la compresiunea arterială) și este urmat de o

depresie completă a activității simpatice în caz de prelungire (3–10 min). În cursul răspunsului ischemic central, reflexul baroreceptor determină bradicardie. Când aerul inspirat este bogat în CO₂, vasoconstricția simpatică activată prin răspuns ischemic central contracarează chiar și vasodilația directă produsă de hipoxie și hipercapnie, în toate regiunile cu excepția creierului și a pielii. Hiperventilația este cea care compensează modificările de concentrație a gazelor respiratorii și permite normalizarea presiunii arteriale și a distribuției debitului sanguin.

Un mecanism absolut particular de control nervos al arteriolelor este reflexul de axon de la nivel cutanat. Impulsurile din fibrele senzitive sunt conduse prin ramuri colaterale speciale înapoi la vase, unde duc la eliberarea de substanță P, ce determină vasodilație și creșterea permeabilității capilare.

d) Căile eferente sunt reprezentate de fibrele parasimpatice din trunchiul vagului și, mai ales, de elementele nervoase ale simpaticului toraco-lombar (fig. 7.32).

Primele, acționând în sens inhibitor numai asupra cordului, întrețin tonusul vagal al inimii și, prin intermediul acestuia, influențează negativ debitul cardiac și funcția circulatorie. Secționarea vagilor în regiunea cervicală este urmată, de altfel, de tahicardie și de hipertensiune arterială tranzitorie de defrenare.

Fibrele parasimpatice de pe traiectul nervilor cranieni VII și IX acționează limitat asupra unor teritorii glandulare cefalice, iar parasimpaticul sacrat influențează în sens vasodilatator doar sfera pelvină.

În schimb, componenta simpatico-adrenergică controlează atât activitatea ritmică a pompei cardiace, cât și întregul teritoriu vascular (fig. 7.33).

Acțiunea vasculară a sistemului eferent simpatic depinde de tonusul centrilor vasomotori și de teritoriul asupra căruia acționează. La nivelul arterelor, mai exact al arteriolelor aparținând circulației generale, simpaticul este vasoconstrictor. Una din primele dovezi experimentale privind influența sistemului nervos simpatico-adrenergic asupra vaselor a fost adusă de Cl. Bernard (1852), care, secționând simpaticul cervical la iepure, a obținut vasodilație și creșterea temperaturii urechii de partea respectivă; prin excitarea capătului periferic al acestuia, a produs efecte contrarii de tip vasoconstrictor. În anumite teritorii vasculare (mușchi striat, inimă, creier), descărcările eferente simpatice acționează în sens dilatator, printr-un mecanism amplu discutat în literatură. După majoritatea autorilor, atât acțiunea stimulantă cardiacă, cât și cea dublă vasculară se datoresc efectelor musculare, directe, asupra unor receptori specifici și efectelor metabolice, indirecte, ale mediatorilor simpatico-adrenergici, noradrenalina și adrenalina. Răspunsurile vasculare de un sens sau altul depind, după Ahlquist (1948), de predominanța receptorilor adrenergici de tip alfa (vasoconstrictori) sau beta (vasodilatatori) din intimitatea peretelui vascular. În afara simpaticului cu cele două tipuri de receptori adrenergici, un rol important deține, în vasomotricitate, simpaticul dilatator colinergic. După Folkow și Uvnäs (1954), acesta ar produce pe cale cortico-hipotalamo-spinală vasodilația neuro-reflexă de la nivelul musculaturii striate în stare de activitate.

Printr-un mecanism similar, de natură simpatico-colinergică, se realizează și vasodilația cutanată din timpul secreției sudorale. Fenomenul, fiind potențat de ezerină și suprimat prin atropină, pare a avea la bază participarea acetilcolinei ca substanță mediatore. Stimularea fibrelor simpatice colinergice de la nivelul glandelor sudoripare duce însă și la formarea de bradikinină, puternic vasodilatatoare. Participarea acesteia la producerea transpirației din timpul fenomenelor de predominanță simpatică (efort fizic, emoții, agresivitate etc.) este în prezent unanim admisă.

Intricarea neuro-umorală dintre structurile simpatico-adrenergice, pe de o parte, și cele colinergice, pe de alta, dublată de interdependența simpatico-parasimpatică fac adeseori dificilă identificarea și diferențierea lor morfo-chimică și funcțională. Pe plan funcțional, descărcările eferente simpatice acționează simultan pe cord, vene și artere, determinând răspunsuri compensatoare din partea întregului aparat cardio-vascular. Luate în ansamblu, acestea sunt de tip vasoconstrictor, tahicardizant și hipertensiv. Hipertensiunea realizată de fenomenele de predominanță simpatico-adrenergică se datorește creșterii atât a debitului cardiac, cât și a rezistenței periferice.

Intensitatea reacțiilor reflexe vasculare depinde de bogăția inervației simpatice din teritoriul respectiv și de tonusul centrilor vasomotori. Datorită acestui fapt, splina, rinichiul, intestinul și pictea prezintă o

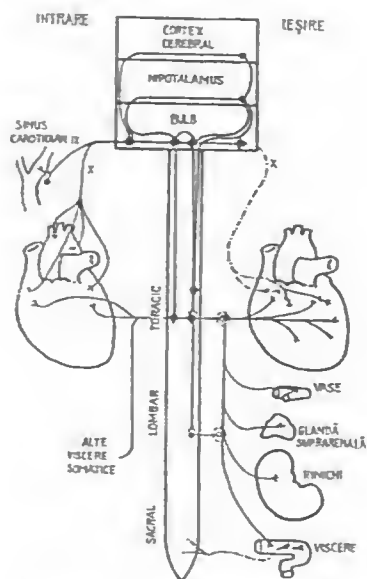


Fig. 7.32. Căi eferente simpatico-parasimpatice.

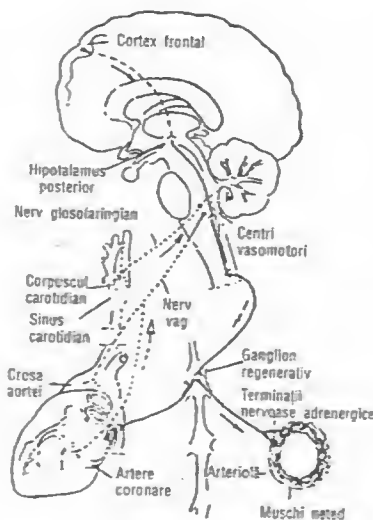


Fig. 7.33. Controlul reacțiilor simpatico-parasimpatice cardio-vasculare.

vasomotricitate mai crescută decât mușchii scheletici, inima sau creierul, care realizează fluctuații mari circulatorii pe cale predominant umorală. Vasoconstricția din teritoriul splanhnic, de exemplu, dirijează sângele spre țesutul muscular sau cerebral activ și invers, determinând o veritabilă balansare circulatorie abdomino-periferică.

La rândul său, calea eferentă vagală participă la reglarea neuro-reflexă a circulației prin intermediul cordului, ale cărei frecvență și forță de contracție diminuate contribuie, alături de scăderea tonusului nervos simpatic, la reducerea debitului cardiac și la coborârea presiunii sanguine, ori de câte ori acestea are tendință la creștere peste valorile normale.

Calea eferentă vago-simpatice asigură astfel legătura dintre centrii reflecși coordonatori ai activității cardio-vasculare și organele efectoare respective, constituind veriga nervoasă indispensabilă oricărei ajustări hemodinamice rapide impuse de nevoile locale sau generale ale organismului.

7.3.3.2. Reglarea umorală

Reglarea umorală completează și prelungește în timp efectele reglării nervoase. Ea se realizează cu ajutorul substanțelor vasoconstrictoare și vasodilatatoare, reprezentate de mediatorii chimici simpatico-parasimpatici, cataboliții acizi, hormonii locali de tipul monoaminelor (serotonină, histamină) și polipeptidelor vasoactive (bradikinină, angiotensină), al gazelor sanguine, principalilor ioni etc.

Controlul rapid al presiunii arteriale se realizează în special prin reflex baroreceptor, care este mai sensibil față de modificări decât față de valoarea propriu-zisă a presiunii arteriale și se resetează rapid. În general, mecanismele nervoase de control presional sunt eficiente pe termen scurt și mediu. Pe termen mediu și mai ales lung, presiunea arterială este reglată prin controlul lichidelor corpului, mecanismele efectoare fiind ingestia de apă și sare și excreția lor renală. Pentru controlul pe termen lung al presiunii arteriale, mecanismul principal este reglarea excreției renale de apă, prin fenomenul de diureză și natriureză presională. Emisia zilnică de urină (diureză) depinde de rata de filtrare glomerulară și de cea de reabsorbție tubulară a apei, ambele fiind influențate de presiunea arterială.

Curba funcției renale arată normal, în funcție de presiunea arterială medie, următoarele: un debit de urină finală nul la ~50 mmHg, diureză normală la ~100 mmHg, diureză dublă la ~130 mmHg și o creștere abruptă la valori mai mari (de 8 ori la ~200 mmHg). Intersecția curbei presionale a eliminării de apă cu orizontala aportului normal de apă definește un punct de echilibru. Modificarea cronică a aportului de apă nu duce la modificarea curbei de diureză presională, ci la schimbarea punctului de echilibru. Modificări ale funcției renale se reflectă pe diagrama excreției renale de apă, astfel că se redefinesc punctul de echilibru, adică valoarea presiunii arteriale la care nu există câștig sau pierdere netă de apă. Din această analiză rezultă faptul esențial că modificările rezistenței periferice nu afectează presiunea arterială pe termen lung, decât dacă sunt afectate funcția renală sau ingestia de apă.

Supraîncărcarea hidrică a organismului crește volumul extracelular, inclusiv volemia, fapt ce duce la retur venos crescut, cu creșterea debitului cardiac și, deci, a presiunii arteriale. La această secvență cauzală se adaugă o buclă bazată pe creșterea de rezistență periferică prin fenomen generalizat de autoreglare tisulară a debitului sanguin local. În ce privește ingestia, sarea are efect mai puternic decât apa, deoarece creșterea ingestiei saline determină osmolaritate crescută, care, pe de o parte, stimulează ingestia de apă prin acțiune asupra centrului setei, iar, pe de altă parte, crește reabsorbția renală de apă, datorită secreției crescute de hormon antidiuretic (ADH), determinată de stimularea osmoreceptorilor hipotalamici. Ambele căi duc la supraîncărcarea hidrică a organismului. Contribuția renală la reglarea presiunii arteriale se bazează pe funcția excretorie, dar implică numeroase mecanisme intricate umorale, cum sunt cele care urmează.

a) **Substanțele mediatore.** Din categoria substanțelor mediatore prevăzute cu acțiuni vasoconstrictoare fac parte mediatorii simpatico-adrenergici, *noradrenalina* și *adrenalina*, cunoscute sub numele generic de catecolamine. În timp ce noradrenalina provoacă efecte predominant vasoconstrictoare de 1,5-1,7 ori mai puternice decât ale adrenalinei, aceasta din urmă determină răspunsuri bifazice, vasoconstrictoare urmate de vasodilatație compensatoare. Proprietățile vasoconstrictoare ale catecolaminelor se exercită cu predominanță asupra teritoriului arteriolo-capilar din ariile: splanhnică (splină, ficat, rinichi,

intestin), pulmonară și cutanată, bogate în receptori adrenergici. Spre deosebire de noradrenalină, care, cu mici excepții, acționează numai asupra alfa-receptorilor adrenergici (vasoconstrictori), adrenalina stimulează și beta-receptorii adrenergici (vasodilatatori). De aici, efectele sale duble, atât vasoconstrictoare, cât și vasodilatatoare.

În general, sensul reacțiilor vasculare ține de predominanța unuia din cele două tipuri de receptori adrenergici. La nivelul vaselor coronare, de pildă, predominând receptorii de tip beta-adrenergic, mediatorii simpatici produc efecte coronarodilatatoare. Vasele musculaturii striate, inimii și creierului, fiind mai puțin sau deloc afectate de mediatorii simpatici, permit deplasarea sângelui mobilizat din organele abdominale de depozit către acestea, în vederea activării circulației la nivelul teritoriilor solicitate în timpul reacțiilor adreno-simpatice de tip ergotrop.

Paralel cu efectul vasoconstrictor periferic, catecolaminele circulante produc activarea formațiunii reticulate și centrilor vasomotori implicați în apariția răspunsurilor reflexe de autoreglare nervoasă, adaptare și control al circulației (fig. 7.34).

În plus, prin acțiunea metabolică indirectă, catecolaminele, și îndeosebi adrenalina, intensifică glicoliza, cu participarea cAMP rezultat din activarea adenilat ciclazei membranare, formatoare de acid lactic, dilator și permeabilizant capilar. Acesta participă la producerea vasodilatației compensatoare, împreună cu ioni de potasiu și cu plasmakininele formate secundar activării proteazelor tisulare (kalicreine) de către adrenalină.

Contrar catecolaminelor, *acetilcolina*, făcând oficiul de mediator chimic al fibrelor parasimpatice terminale și simpatico-parasimpatice ganglionare, acționează mai complex. Prin acțiunea parasimpatomimetă directă provoacă vasodilatație periferică și inhibarea activității contractile a cordului. Răspunsurile dilatator și cardioinhibitor sunt însă de scurtă durată, datorită inactivării imediate de către colinesteraze. Cea de-a doua acțiune a acetilcolinei, excitoganglionară, contribuie la apariția reacțiilor compensatoare adreno-simpatice, eliberatoare de catecolamine, de la nivelul ganglionilor simpatici și medulosuprarenalei, considerată, din punct de vedere funcțional, drept ganglion simpatic mai dezvoltat. Ca exemplu de reacție compensatoare simpatică poate fi dat fenomenul de scăpare ventriculară (*escape*), a cărui natură adrenergică a fost dovedită cu ajutorul reserpinei, substanță spoliatoare de catecolamine. În timp ce la animalul normal inima oprită prin excitarea electrică a vagului își reia contractilitatea ritmică înainte de întreruperea stimulării, reluarea activității contractile a cordului nu se mai produce pe preparatul în prealabil reserpinizat. Rezultă că, în condiții normale, acetilcolina exercită atât efecte cardioinhibitoare directe, cât și acțiuni indirecte, catecolamin-eliberatoare la nivelul structurilor simpatico-adrenergice. Prin acțiunile indirecte, acetilcolina asigură antagonismul interstimulant dintre componenta vagală și cea simpatică a reglării circulației.

b) **Cataboliții acizi.** În afara mediatorilor chimici simpatico-parasimpatici, un rol important în autoreglarea presiunii sanguine revine cataboliților acizi (CO_2 , H^+ , acid lactic, ATP, adenosină etc.). Aceștia sunt puternici vasodilatatori și hipotensori. Acțiunea lor se exercită cu predominanță la nivelul vaselor mici din teritoriul arteriolo-capilar. Prin efectele dilatatoare locale asigură în primul rând creșterea fluxului sanguin și satisfacerea nevoilor circulatorii crescute ale organelor în stare de hiperactivitate, fenomen cunoscut sub denumirea de hiperemie funcțională. Creșterea conținutului în cataboliți acizi, rezultați din combustii exagerate tisulare, intervine apoi în reacțiile vasodilatatoare locale și generale din timpul diverselor suprasolicitații (fizice, neuro-psihice, traumatiche etc.), în vederea contracarării vasoconstricției adreno-simpatice și tendinței la hipertensiune neuro-reflexă. Acumulați în exces, cataboliții acizi pot sustrage, prin vasodilatația arterelor mici și permeabilizarea exagerată a capilarelor, o parte importantă din volumul sanguin, predispuând la hipotensiune și chiar colaps vascular. În cazul bioxidului de carbon, ca

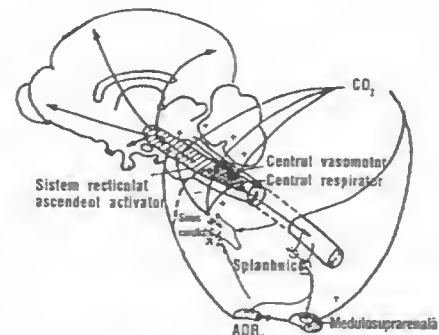


Fig. 7.34. Influențe umorale asupra centrilor vasomotori din formațiunea reticulară.

principal catabolit acid, acțiunea vasodilatatoare periferică este dublată însă de reacții vasoconstrictoare și hipertensive de origine reflexă, produse prin stimularea medulosuprenalei, zonelor reflexogene și centrilor vasomotori din formațiunea reticulată bulbară.

În felul acesta, cataboliții acizi rezultați din combustiiile celulare acționează nu numai ca factori locali de drenaj biologic, ci joacă un rol determinant în producerea fenomenelor de reglare și adaptare a circulației la nevoile nutritive tisulare.

c) **Hormonii locali.** Cea de a treia categorie de factori umorali implicați în autoreglarea presiunii sanguine este reprezentată de hormoni locali, sau tisulari. Aceștia sunt substanțe biologic active rezultate din metabolismul propriu al țesuturilor și necesare atât asigurării fluxului sanguin local, cât și activității lor specifice. Dintre factorii umorali care-și dispută candidatura pentru rolul de hormoni locali implicați în reglarea circulației fac parte histamina, serotonina și polipeptidele vasoactive.

Histamina este un puternic agent dilatator al arteriolelor, dublat de o marcată acțiune de creștere a permeabilității capilare. Cele mai mari cantități de histamină se găsesc în piele, tubul digestiv și țesutul pulmonar. Ea rezultă din decarboxilarea histidinei la nivelul mastocitelor, unde se găsește depozitată sub formă de granule, alături de heparină, și se eliberează atât spontan, cât, mai ales, în timpul agresiunilor tisulare fizice sau chimice, reacțiilor alergice etc. Iritația filetelor senzitive provoacă, prin reflexe locale de axon, eliberarea unei substanțe puternic vasodilatatoare de tip histaminic. Acumulată în exces, aceasta poate duce la dereglarea presiunii sanguine, predispunând la hipotensiune și stare de șoc. În condiții normale, intervenția ei este însă limitată la autoreglarea circulației locale și constă în dilatarea ritmică a sfincterului arteriilor precapilar.

La rândul său, **serotonina** – metabolit al triptofanului, provoacă vasoconstricție în teritoriul splanhnic și vasodilatație cutanată, mai marcată la nivelul segmentului cefalic. Efectele sale, diferite în funcție de aria vasculară, afectează homeostazia circulatorie în tumorile carcinomice ale tubului digestiv, hipersecretoare de serotonină.

Un rol important în reglarea umorală a presiunii se atribuie în ultimul timp **polipeptidelor vasoactive**, reprezentate de **plasmakinine** și **angiotensină**.

Plasmakininele rezultă din acțiunea unor enzime proteolitice asupra precursorului α_2 -globulinic, denumit kininogen. Principala enzimă proteolitică implicată în formarea de kinine plasmatice este **kalicreina**, prezentă în țesuturi și uneori sub formă inactivă, de **kalicreinogen**. Anoxia, acidifierea, traumele tisulare și reacțiile de tip antigen-anticorp transformă kalicreinogenul inactiv în **kalicreină activă**, formatoare de plasmakinine.

Dintre acestea fac parte **bradikina**, formată din 9 aminoacizi, **kalidina**, din 10 aminoacizi, și **metionilkalidina**, cu 11 acizi în lanțul polipeptidic. Cea mai activă s-a dovedit a fi **bradikina**, prevăzută cu proprietăți puternice vasodilatatoare. Injectarea a 1 μ g de **bradikinină** în artera brahială la om determină creșterea de 6 ori a fluxului sanguin în membrul superior respectiv. Introducerea unei cantități infime intradermică provoacă un marcat edem local prin creșterea permeabilității capilare.

La concentrații molare egale, efectele dilatatoare și permeabilizante ale **bradikininei** sunt de 10-15 ori mai intense decât ale **histaminei**. În timp ce presiunea sistolică scade brutal, frecvența și debitul cardiac cresc, ca urmare a reacțiilor neuro-reflexe declanșate de efectele iritante ale **bradikininei** asupra filetelor senzitive. Ca și **histamina**, **plasmakininele** par să dețină un rol mai mult fiziopatologic, participarea lor fiind limitată în condițiile normale la reglarea și adaptarea circulației locale.

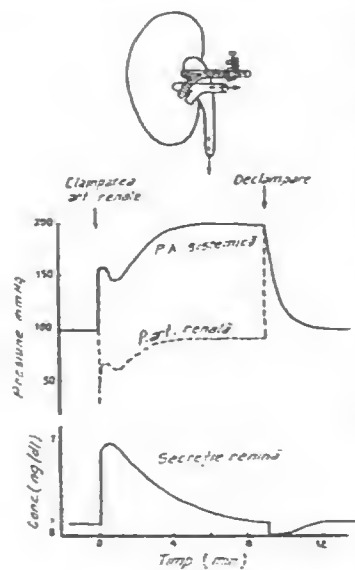


Fig. 7.35. Efectele presiunii arteriale asupra clampării arterelor renale.

Angiotensina este un octapeptid prevăzut cu acțiuni vasoconstrictoare de 40-60 de ori mai puternice decât ale noradrenalinei. Ea rezultă din acțiunea enzimelor proteolitice – **renina** – asupra unui precursor plasmatic de natură α_2 -globulinică, denumit **angiotensinogen**, și a enzimelor de conversie a angiotensinei I inactive în **angiotensină II activă**. Principala sursă de **renină** constituind-o aparatul juxtaglomerular de la nivelul arteriolelor aferente ale rinichiului, toate dereglările circulatorii care produc ischemie renală, inclusiv clamparea arterelor renale, se însoțesc de lansarea acesteia în circulație și de formare crescută de **angiotensină** (fig. 7.35). Prin constricția arteriolelor de la nivelul circulației generale și renale, **angiotensina** determină creșterea presiunii sanguine, ca urmare a rezistenței periferice crescute, precum și retenția de apă și săruri în organism. Participarea sistemului **renină-angiotensină** la menținerea sau dereglarea echilibrului hidroelectrolitic este mai complexă. După cum se va vedea la capitolul de fiziologie renală, un rol important revine secreției de **aldosteron**, stimulată de către **angiotensină**. Prin acest dublu mecanism, activitatea sistemului **renină-angiotensină** participă atât la autoreglarea presiunii sanguine, cât și la realizarea hipertensiunii de cauză renală. Hipotensiunea, scăderea Na^+ plasmatic, volumul sanguin și fluxul renal stimulează secreția de **renină** și formarea de **angiotensină**, în vederea restabilirii echilibrului tensional și invers. Ischemia renală, produsă de scăderea presiunii arteriale, determină **renin-eliberarea**, duce la formarea crescută de **angiotensină**, ale cărei acțiuni vasoconstrictoare cresc rezistența periferică și volumul sanguin în hipertensiunea arterială renală (fig. 7.36). În paralel, crește eliberarea de **kalicreină** și **eritropoietină** renală, în vederea întregirii reacțiilor vasculare și volumice necesare restabilirii echilibrului tensional (fig. 7.37).

Un interes crescând pentru homeostazia circulatorie se acordă în ultimul timp participării posibile a prostaglandinelor și vasopresinei.

Prostaglandinele, rezultate din degradarea acizilor grași nesaturați (arahidonic, prostanoic etc.) cu ajutorul ciclooxigenazelor tisulare, prezintă acțiuni vasoconstrictoare, în cazul seriei F_{1a} și F_{2a} , și vasodilatatoare, în cazul

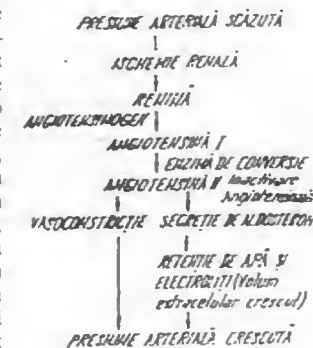


Fig. 7.36. Teoria renină-angiotensină a reglării presiunii arteriale.

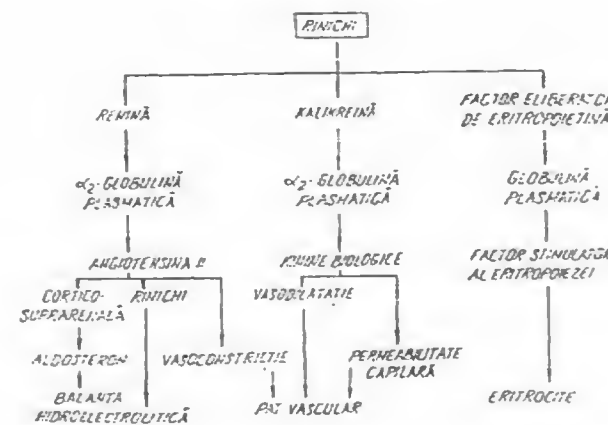


Fig. 7.37. Rolul rinichiului în homeostazia circulatorie.

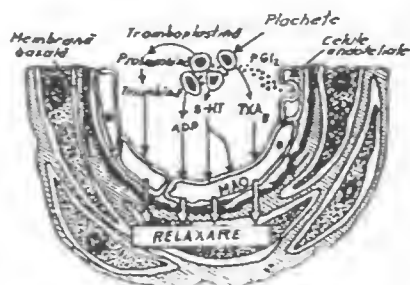


Fig. 7.38. Rolul factorului endotelial de relaxare (după Shepherd și Vanhoutte, 1985).

Participarea ei la reacțiile umorale compensatoare a fost dovedită experimental de cazurile de scădere marcată (60 mmHg) a tensiunii arteriale.

Hormonul antidiuretic (ADH, vasopresină), secretat în hipofiza posterioară, este eliberat de neuroni hipotalamici ca răspuns la stimularea osmoreceptorilor hipotalamici, ca în deshidratare sau în iogestie salină excesivă. Acestea determină și sezoație de sete, stimulând ingestia de apă, după cum am menționat. ADH determină retenția de apă (emisia de volume mici de urină concentrată), prin creșterea reabsorbției apei în tubii distali și colectori, datorată formării (cAMP-mediată) de pori în membrana apicală a celulelor epiteliale tubulare. Dacă mecanismul este activat de ingestia salină crescută, retenția hidrică poate duce în timp la hipertensiune arterială. În caz de ingestie crescută hidrică, nu și salină, secreția de ADH scade sub valorile bazale, permițând reechilibrarea hidrică, nu numai prin diureză presională, ci și prin scăderea reabsorbției de apă. Creșterea volumiei stimulează voloreceptorii atriali (de fapt baroreceptori de joasă presiune), determinând inhibiția reflexă a secreției de ADH.

În efortul prelungit, în special la temperatură crescută, sudorajia intensă cu scop termoregulator determină pierdere de apă și sodiu, deci hipovolemie cu osmolaritate normală. Aceasta nu este bine compensată prin ingestie de apă, deoarece setea și secreția de ADH nu sunt stimulate suficient, iar apa ingerată este pierdută mai ales prin urină. Procedul adecvat constă în ingestia programată de lichide sărate și dulci pentru prevenirea deshidratării și menținerea performanței generale circulatorii și fizice.

Factorul natriuretic atrial (ANF) sau atriopeptinul (AP), eliberat de cardiomiocitele atriale sub influența distensiei auriculare, este un peptid format din 28 de aminoacizi, care are acțiuni vasodilatatoare, hipotensive, diuretice și natriuretice. El participă la reacțiile neuro-endocrine compensatoare produse de întinderea fibrelor musculare atriale determinată de întoarcerea veooasă crescută și supraincercarea auriculelor în general (fig. 7.39).

În afara acțiunilor inhibitoare asupra resorbției tubulare de sodiu și secreției de renină, ANF inhibă eliberarea de aldosteron și vasopresină, contracarând efectele centrale și periferice ale sistemului renină-angiotensină.

Alte peptide prezente în cord (substanța P, neurotensina, VIP) par să participe la autoreglarea umorală a circulației și balanței hidrosalioe.

7.3.3.3. Integrarea reacțiilor nervoase și umorale

Între reglarea neuro-umorală rapidă, asigurată prin reacții reflexe compensatoare de tip simpatico-parasimpatic, și cea predominant hormonală de lungă durată se situează un sistem intermediar de reglare și control, reprezentat de reacțiile vasculare locale (stresul de relaxare) și schimbul lichidian capilar. La acestea se adaugă sistemul renină-angiotensină-aldosteron, care, prin controlul lichidian renal și modificările

seriilor PGA și PGE. Efectele lor vasculare sunt implicate mai mult în autoreglarea circulației locale. Spre deosebire de prostaglandine, tromboxanii participă atât la producerea vasoconstricției locale, cât și la activarea agregării plachetare, formatoare de trombusuri vasculare.

Prostaciclina (PGL_2) este unul din factorii relaxanți de origine endotelială și se opune atât agregării plachetare, cât și efectelor vasoconstrictoare ale tromboxanilor (TXA_2) și serotoninei (5-HT), producând relaxarea vaselor de calibr mic ale teritoriului arteriolo-capilar. Participarea celulelor endoteliale la generarea de PGL_2 și inhibarea efectelor agregante și vasoconstrictoare ale TXA_2 este schițată în fig. 7.38.

Prezența monoaminoxidazei (MAO) în endoteliul vascular asigură degradarea concomitentă a serotoninei.

Vasopresina, deși își exercită acțiunea principală asupra resorbției tubulare de apă, intervine și în reglarea presiunii sanguine prin efectele sale vasoconstrictoare.

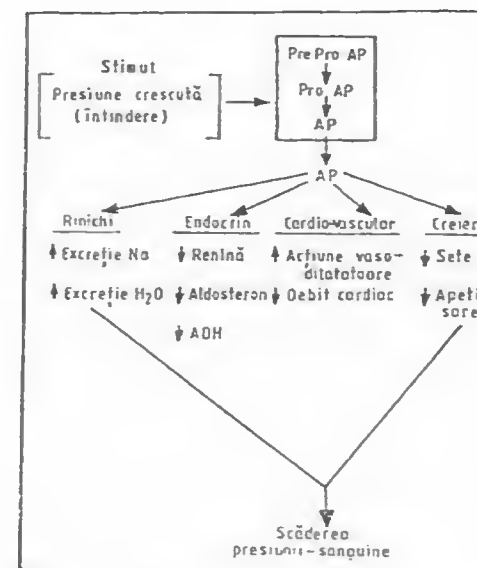


Fig. 7.39. Participarea atriopeptinului (AP) la reglarea presiunii sanguine.

volemice corespunzătoare, asigură trecerea de la reglarea neuro-umorală rapidă la reglajul hormonal de lungă durată. Computerizând reacțiile nervoase și umorale compensatoare, Guyton (1973) a izbutit să stabilească secvența și durata acestora (fig. 7.40).

În timp ce răspunsurile reflexe baro- și chemoreceptoare apar în primele secunde de la producerea dezechilibrului hemocirculator, cele umorale se instalează mai lent, în minutele și orele următoare. Acțiunea conjunctă a celor două componente se realizează prin fenomene de autoreglare și control de tip cibernetic.

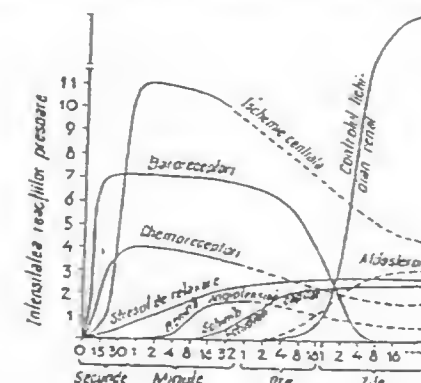


Fig. 7.40. Secvența răspunsurilor compensatoare neuro-umorale (după Guyton, 1973).

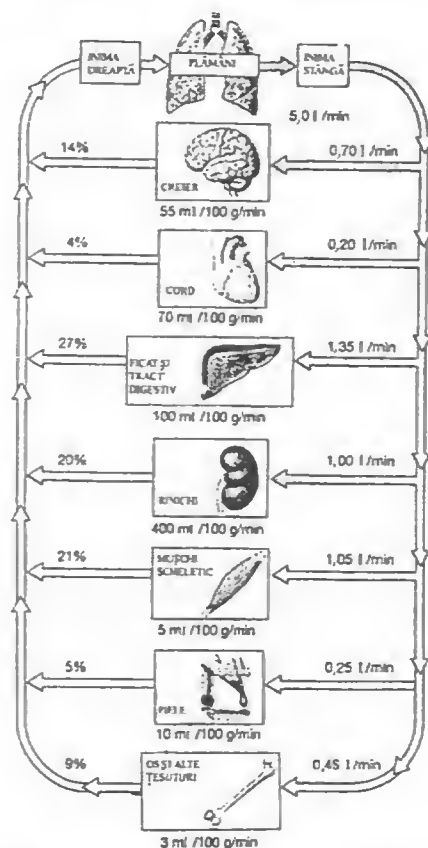


Fig. 7.43. Distribuția sângelui în corpul uman în repaus.

7.3.4. DISTRIBUȚIA TISULARĂ A FLUXULUI SANGUIN

Debitul sanguin este distribuit pe organe și segmentele lor (fig. 7.43) prin modificări de secțiune transversală a arterelor. Arteriolele și arterele mici (diametru $<0,1$ mm) reprezintă componenta majoră a rezistenței periferice. Rețeaua vasculară este foarte ramificată (de 8–13 ori succesiv) pentru a asigura proximitatea celulelor față de sursa de oxigen și nutrimente, adică minimizarea distanței de difuzie (maximum 25 μ m de la oricare celulă la cel mai apropiat capilar), prin prezența a 10^{10} capilare în întregul organism (tabelul 7.11). Capilarele au 4–9 μ m diametru, 0,5 μ m grosimea peretelui, ~ 500 m² suprafață

totală a peretelui, fante perietale largi de 7 nm. Ultimele ramificații arteriale sunt metarteriolele, care, împreună cu sfincterul precapilar, reprezintă ultimul etaj de distribuție și de reglare; datorită vasomoției, circulația prin fiecare capilar este intermitentă în repaus.

TABELUL 7.11

Vascularizația diferitelor organe			
Organ	%	ml/min	ml/min/100 g
cord	4	200	70
cerebr	14	700	50
rinichi	22	1 100	360
ficat	27	1 350	95
portal	21	1 050	
arterial	6	300	
musculatură	15	750	4
oase	5	250	3
tegument	6	300	3
tiroidă	1	50	160
suprarenale	0,5	25	300
altele	5,5	275	
total	100	5 000	

7.3.4.1. Controlul microcirculației de către sistemul nervos vegetativ

Arterele prezintă la nivelul adventiceei un plex „perivascular” (acesta este mai slab reprezentat la nivel venos), format din fibre subțiri nemielinizate, cu numeroase varicozități, sediul eliberării neurotransmițătorilor. Cu toate că nu există o membrană postsinaptică delimitată, specializată, în cazul acestei joncțiuni neuro-efectoare, termenul de sinapsă și cele derivate sunt folosite în descrierea controlului nervos al mușchiului neted vascular la acest nivel. Fibrele menționate sunt terminații axonale ale neuronilor simpatici, cu corpul celular plasat în ganglionii paravertebrali. Vasele sanguine mai posedă și inervație senzitivă, iar în unele teritorii fibre motorii parasimpatice determină vasodilatație. Alte fibre motorii sunt cele vasodilatatoare simpatiche și cele non-adrenergice non-colinergice (NANC). Dintre cele două componente ale sistemului nervos vegetativ, cea simpatică este mult mai bine reprezentată și mai activă la nivel vascular. Există un puternic tonus simpatic vasoconstrictor; vasodilatația neurogenă poate fi determinată prin inhibiție presinaptică.

Noradrenalina, ca mediator principal, cotransmițătorii ATP și neuropeptidul Y acționează sinergic, prin intermediul receptorilor corespunzători din membrana miociului neted vascular, pentru a asigura cotransmisia în această joncțiune neuro-efectoare simpatică. Vasoconstricția simpatică este mediata mai ales de adrenoreceptorii postsinaptici α_1 (uneori și α_2) și, în oarecare măsură, de purinoceptorii P_{2U} . Constrația neurogenă a mușchiului neted vascular este determinată de influxul de calciu prin canale receptor-operate, controlate direct de receptori P_{2U} și de activarea eliberării de calciu IP_3 -dependentă de către α_1 -adrenoreceptorii, cu o contribuție majoră a canalelor de calciu de tip L , ca rezultat al depolarizării.

Eliberarea mediatorilor este inhibată de noradrenalină (prin acțiune pe α_2 -adrenoreceptorii presinaptici), NO de origine neuronală (NANC) și endotelială, acetilcolină, ce acționează direct asupra receptorilor presinaptici muscarinici, sau prin stimularea eliberării endoteliale de NO, ca și de factori implicați în autoreglarea metabolică și inflamație. Aceste ultime două mecanisme sunt funcționale cele mai importante, realizând eficiența vasodilatației în pofida tonusului simpatic. Eliberarea poate fi crescută de noradrenalină (prin acțiunea pe receptori β presinaptici) și de către angiotensina II.

Controlul nervos este important pentru reglarea presiunii arteriale, distribuția debitului sanguin, ca și pentru ajustarea presiunii capilare de către balanța dintre contracția sfincterelor pre- și postcapilare.

7.3.4.2. Controlul local al microcirculației

Aportul sanguin este eficient adaptat mai multor necesități tisulare:

- aport de oxigen și nutrienți (glucoză, acizi grași, aminoacizi),
- îndepărtarea bixidului de carbon și a ionilor de hidrogen,
- aducerea la celulele țintă a diverselor substanțe bioactive,
- limitarea variațiilor în concentrațiile în interstițiu.

În multe organe, funcțiile speciale depind direct de o perfuzie sanguină adecvată. Astfel sunt termoliza cutanată și excreția renală.

Controlul pe termen scurt (secunde, minute) este realizat prin modificarea diametrului arterial, ca rezultat al modificării tensiunii mușchilor netezi. O creștere de opt ori a activității metabolice poate duce la nivelul mușchilor scheletici la o creștere de patru ori a debitului sanguin, în timp ce o scădere a aportului de oxigen la 25% determină triplarea debitului.

Substanțele vasodilatatoare de origine locală implicate în controlul metabolic al debitului sanguin includ: adenosina (ATP), CO_2 (pH, acid lactic), ioni de potasiu.

Vasomotonia este condiția periodică a metarteriilor și sfincterelor precapilare. Hiperemie reactivă înseamnă vasodilatație postischemică.

Hiperemie activă (funcțională) înseamnă vasodilatație concomitentă cu o creștere a activității tisulare.

Autoreglarea, prin mecanisme metabolice și miogene, constă în menținerea debitului sanguin bazal în condițiile modificărilor de presiune. Intervalul de autoreglare (75–175 mmHg), ca și eficiența acesteia, variază de la un țesut la altul. Vom discuta mai jos implicarea NO în medierea vasodilatației de răspuns la modificări intravasculare și stres de forfecare.

Hiperemie reactivă (postischemică) înseamnă o creștere tranzitorie a debitului sanguin local peste valorile de repaus, produsă după ce cauza unei stări de ischemie (hipoxie prin hipoperfuzie obstructivă sau compresivă) a fost îndepărtată.

Controlul pe termen lung (zile, luni) implică modificări de morfologie vasculară, ce se produc mai rapid la vârste tinere. Aici se încadrează, de exemplu, anginele ca răspuns la ischemie, activitate crescută, creșterea, țesuturile fiind însoțite de un deficit relativ al aportului de oxigen. Factorii de creștere sunt extrem de numeroși, reprezentați de oligopeptide de diverse tipuri și citokine tisulare. Deschiderea vaselor colaterale se produce în decurs de minute, iar creșterea vasculară are loc în interval de câteva zile (cornare). Proliferarea începe prin înmugurirea de la nivelul venulelor, cu disoluția membranei bazale și proliferarea celulelor endoteliale și continuă cu formarea chemotactică a unor extensii de tip cordoanelor, urmată de plierea acestora în formă de tub și conectarea în anse de diferite lungimi și, eventual, invazia lor cu mici celule netede.

7.3.4.3. Reglarea activității mușchilor netezi prin intermediul endoteliului

Endoteliul vascular, un mononuclear subțire de celule dispuse pe suprafața internă a vaselor sanguine, prezintă numeroase și variate funcții. Endoteliul capilar este esențial în schimbul de substanțe dintre sânge și țesuturi. Endoteliul oferă vaselor sanguine o suprafață internă netedă, necesară pentru prevenirea trombozei. Celulele endoteliale secretă factori de creștere, macromolecule ale matricei extracelulare și sunt implicate în metabolismul lipoproteinelor circulante. Endoteliul influențează tensiunea vasculară direct, prin factorii vasoactivi secretați, și indirect, prin preluarea și metabolismul substanțelor vasoactive (catecholamine, nucleotide adeninice etc.).

Celulele endoteliale sunt capabile să secrete factori relaxanți și contractanți, ca răspuns la diverși stimuli. Acesta este poate cel mai bun exemplu de secreție paracrină specializată. Factorii relaxanți derivați

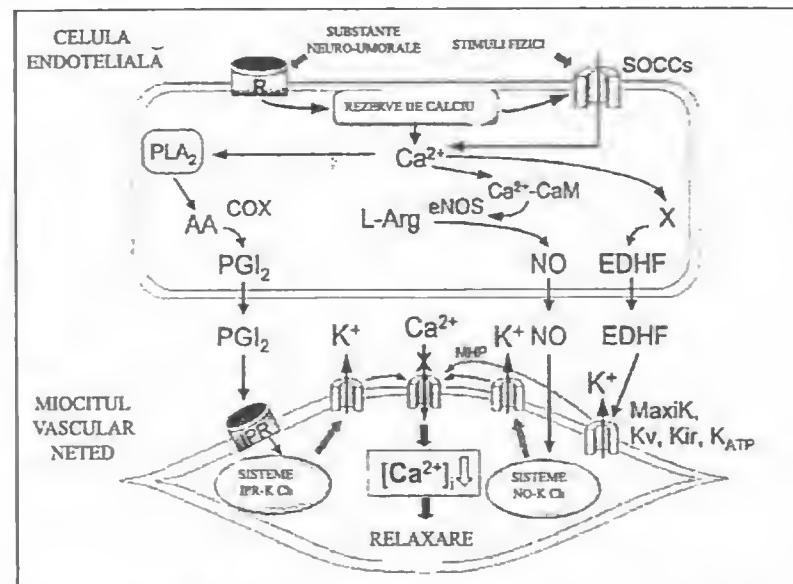


Fig. 7.44. Factori relaxanți de origine endotelială și mecanisme de acțiune: SOCCs, canale de calciu operate de rezerve. PLA₂, fosfolipaza A₂; CaM, calmodulina. COX, ciclooxigenaza. L-Arg, L-arginina. eNOS, nitric oxid sintetizată de tip endotelial. PGI₂, prostaciclina. NO, oxidul nitric. EDHF, factorul hiperpolarizant derivat din endoteliu. IPR, receptori pentru izoprostani. K⁺ Ch, canale de potasiu. MaxiK, canale de potasiu cu conductanță mare activate de calciu. Kv, canale de potasiu voltaj-dependente. Kir, canale de potasiu cu rectificare spre interior. K_{ATP}, canale de potasiu activate de scăderea ATP. MHP, hiperpolarizare membranală.

din endoteliu (EDRF) cunoscuți până în prezent sunt (fig. 7.44): oxidul nitric (NO), prostaciclina (PGI₂) și factorul hiperpolarizant derivat din endoteliu (EDHF), a cărui natură chimică nu este cunoscută. În inflamație, endoteliul este și o sursă de factori de activare plachetară. Dintre factorii vasoconstrictori de origine endotelială, peptidul numit endotelină este reprezentativ.

Astăzi, implicațiile endoteliului în hemodinamică prin controlul calibrului vascular sunt din ce în ce mai mult privite prin prisma unității morfo-funcționale pe care acesta o realizează cu mușchii netezi vasculari și cu elementele de inervație prezente la nivel parietal. În acest context, importanța factorilor derivați din endoteliu în geneza și evoluția unei largi varietăți de boli este recunoscută și intens investigată, atenuarea eliberării de EDRF fiind asociată cu evoluția aterosclerozei, diabetului, cancerului metastatic etc.

Un rol funcțional important al endoteliului este implicarea sa în controlul fenomenelor vasomotorii. Arterele mici, cu diametrul de ordinul câtorva zecimi de milimetru, sunt cele care prin variații de calibr realizează controlul distribuției fluxului sanguin la nivel tisular și contribuie major la determinarea rezistenței periferice. În secțiunea de rezistență proximală, semnalele pentru dilatație metabolică nu acționează direct; relația funcțională cu vasele din aval este asigurată prin relaxare dependentă de debit și prin conducere în amonte a perturbărilor de potențial membranar prin joncțiuni comunicante.

Se descriu patru moduri fundamentale de transmitere a mesajelor prin joncțiuni comunicante: difuziunea pasivă a mesagerilor secundari; unda regenerativă de calciu; conducerea electrotonică a modificărilor de potențial membranar și potențialul de acțiune regenerativ (în celulele „electric excitabile”).

Celulele endoteliale sunt cuplate prin joncțiuni comunicante, alcătuite din proteine speciale numite conexine. De asemenea, comunicarea intercelulară prin astfel de joncțiuni se realizează și între celulele endoteliale și cele musculare netede subiacente (comunicare heterocelulară), permițând transmiterea bidirecțională a informației între celulele endoteliale și miocitele netede. În arteriolele unde endoteliul și stratul muscular au o mărime comparabilă, modificarea potențialului membranal la nivelul celulelor endoteliale se propagă electrotonic la celulele musculare netede și invers. În arteriolele unde stratul muscular este excedentă în comparație cu cel endotelial, modificarea de potențial de la nivelul miocitelor netede este mică, în comparație cu cea din endoteliul unistratificat. Consecința este că potențialul membranal al celulelor endoteliale este puternic influențat de potențialul miocitelor netede, în timp ce potențialul miocitelor netede este relativ insensibil față de modificările de potențial de la nivel endotelial. Deci, aici comunicarea heterocelulară este aproape unidirecțională.

Pentru a determina rolul precis al unității reglatoare mio-endoteliale în îmbunătățirea perfuziei tisulare și în reglarea metabolică a debitului local, s-au publicat o multitudine de studii privind celulele endoteliale, reactivitatea vasculară și perfuzia tisulară. În acord cu acest concept al reglării metabolice intrinseci, vasodilatația în țesuturile cu o rată metabolică relativ mare este în competiție cu tonusul simpatic vasoconstrictor, prin aceasta ajustându-se balanța între cererea și aportul de oxigen la nivel tisular. Cu toate că structurile oxigen-sensibile ce acționează la nivel tisular local nu sunt complet înțelese, celulele endoteliale în contact direct cu sângele au anumite proprietăți care le conferă posibilitatea de a acționa ca un veritabil senzor de oxigen. Detecția nivelului de oxigen implică depolarizarea și hiperpolarizarea celulelor endoteliale, iar comunicarea este realizată prin propagarea electronică prin joncțiunile comunicante intercelulare dintre endoteliu și mușchiul neted. În timpul hipoxiei, capacitatea țesutului de a extrage oxigenul și de a minimiza aria de șunt (cu rată de perfuzie relativ ridicată față de preluarea tisulară de oxigen) poate fi considerată un test integrativ al funcției endoteliale și coordonării microcirculației. Celulele endoteliale par a juca un rol central în coordonarea sistemului microcirculator și în favorizarea perfuziei tisulare și a ofertei de oxigen. În unele situații patologice, cuplarea celulară interendotelială anormală și perturbarea răspunsului arteriolar propagat pot explica afectarea perfuziei tisulare și extracția anormală de oxigen.

Oxidul nitric. Dintre factorii relaxanți derivați din endoteliu, cel mai cunoscut este oxidul nitric. Oxidul nitric (NO) este o moleculă-senal cu multiple funcții în diverse țesuturi. NO este produs, alături de citrulină, din L-arginină, sub acțiunea catalitică exercitată de nitric oxid sintetază (NOS).

NOS este prezentă în endoteliul vascular, mușchiul neted și cardiac, neuroni și multe alte tipuri de celule. Ea poate fi constitutivă (cNOS) sau inducibilă (iNOS; NOS tip II). Forma iNOS nu este calciu-dependentă, fiind activată de citokine (factorul de necroză tumorală, interleukine) și de endotoxine bacteriene lipopolizaharidice, cu posibile implicații în inflamație. Efectul asupra expresiei genice este manifest după câteva ore, iar nivelul de producție a NO poate fi de mii de ori mai ridicat decât la stimularea cNOS. NO este produs continuu prin activitatea cNOS. În condiții fiziologice, cNOS din celulele endoteliale este reprezentată predominant de forma caracteristică, endotelială (eNOS; NOS tip III), diferită de cea neuronală (cerebrală, nNOS, NOS tip I).

Activitatea cNOS este stimulată de diverse substanțe ce acționează la nivelul receptorilor plasmalemați (acetilcolina, adrenalina și noradrenalina, bradikina, histamina, serotonina, ATP, ADP, insulina, trombina, vasopresina, oxitocina, substanța P, peptidul corelat cu gena calcitoninei (CGRP), peptidul vasoactiv intestinal). Ca urmare, se produce o creștere a calciului citosolic, prin influx și eliberare reticulară. La fel ca în multe alte linii de semnalizare intracelulară, calciul crescut formează un complex cu calmodulina pentru activarea NOS. NOS necesită cel puțin cinci cofactori pentru funcționare optimă: NADPH, tetrahidropterina, FAD, FMN și o grupare heminică (protoporfirina IX).

Funcțiile NO la nivelul aparatului cardio-vascular includ: vasodilatația dependentă de debit, vasodilatația indusă de diverse molecule senale (inclusiv efectul moderator față de acțiuni vasoconstrictoare), rolul antitrombotic, prin inhibarea aderării plachetare, și antiinflamator, prin inhibarea aderării leucocitare, efectul antiproliferativ, precum și o participare complexă în tabloul radicalilor liberi. Interacțiunea NO cu endoteliul vascular determină creșterea permeabilității celulare și favorizează pătrunderea, în și prin inimă, a unor componente intravasculare. Una din cele mai importante implicații funcționale pentru NO este vasodilatația determinată de debit, unde o creștere a debitului crește forța de forfecare (stres tangențial),

producând vasodilatație NO-dependentă. Reducerea producției de NO în cadrul disfuncției endoteliale poate contribui la mecanismele patologice din spasmul coronarian, hipertensiunea arterială, tromboze, inflamații. Diminuarea eliberării endoteliale de NO prezintă corelații cu: vârsta înaintată, dislipidemiile, ateroscleroza, diabetul zaharat, obezitatea.

Un mecanism implicat în multe din acțiunile menționate ale NO este creșterea nivelului de cGMP în celulele țintă, prin activarea intracelulară directă a guanilat ciclazei solubile. NO induce acumularea de cGMP atât în miocitele netede, cât și în celulele endoteliale. În miocitele netede, această acumulare inițiază o secvență de evenimente care au ca rezultat defosforilarea lanțului ușor al miozinei, cu relaxare vasculară consecutivă. Mecanisme dependente de cGMP cuprind și hiperpolarizarea prin activarea canalelor de potasiu, iar NO are și efect direct de activare a K_{Ca} .

Deși mecanismele prin care cGMP promovează relaxarea mușchiului neted sunt încă discutate, linia de acțiune acceptată (vezi fig. 7.44) include activarea PKG și fosforilările prin care aceasta determină scăderea calciului citosolic (prin diminuarea influxului și stimularea extruziei), precum și scăderea sensibilității la calciu a aparatului contractil. Acestea sunt reflectate, în ultimă instanță, prin scăderea fosforilării lanțului ușor al miozinei (vezi fig. 7.44), clasic, datorită scăderii activității kinazei specifice (MLCK), dar posibil și prin activarea fosfatazei corespunzătoare (MLCP), după cum indică cercetări mai recente. Printr-un mecanism similar de activare a guanilat ciclazei, cu formare de ciclic GMP și efectele consecutive, se produce în mare măsură acțiunea vasculară a compușilor ce aparțin clasei numite generic nitroderivați vasodilatatori (nitroglicerina, nitroprusiat de sodiu, nitrați și nitriți organici și anorganici).

Prostaciclina. PGI₂ este generată de către microzomia vaselor sanguine; capacitatea peretelui vaselor mari de a sintetiza PGI₂ este mai mare la nivelul intimei și scade progresiv către adventice. PGI₂ este cel mai puternic inhibitor cunoscut al agregării plachetare și un vasodilatator al tuturor paturilor vasculare testate, fiind un agent hipotensor puternic. În numeroase teritorii vasculare, o parte din relaxarea și hiperpolarizarea endotelio-dependentă a mușchiului neted vascular este mediată de prostaciclina de origine endotelială. Prostanoizii vasodilatatori induc relaxare prin stimularea sintezei de cAMP; acesta stimulează extruzia calciului din citosol și scade sensibilitatea la calciu a aparatului contractil. PGI₂ determină și activarea canalelor de potasiu dependente de ATP (K_{ATP}) din celula musculară netedă, tot prin creșterea (vezi fig. 7.44). Alături de cât și PGI₂, sunt capabili să activeze canalele de K^+ cu rectificare întârziată (Kdr) din celula netedă musculară vasculară.

Factorii hiperpolarizanți derivați din endoteliu. Pentru a putea explica pe deplin modalitatea prin care endoteliul intervine în modularea activității musculaturii netede vasculare, mulți autori au descris existența unui factor difuzibil hiperpolarizant, numit EDHF, care acționează predominant prin activarea canalelor de potasiu dependente de calciu (K_{Ca}), iar hiperpolarizarea rezultată determină relaxarea miocitelor netede vasculare, datorită efectului de scădere a influxului de calciu voltaj-dependent. Natura chimică a EDHF nu a fost încă stabilită, candidații fiind reprezentați de acizi epoxicoisatrienoici (EET), anandamidă, apă oxigenată, potasiu extracelular ușor crescut. Există diferențe considerabile între diferite teritorii privind contribuția relativă a factorilor relaxanți de origine endotelială la fenomenul de vasodilatație dependentă de endoteliu.

Mecanismele prin care substanțele vasoactive determină hiperpolarizare sunt multiple. NO determină direct activarea canalelor de K^+ dependente de calciu (K_{Ca}), cât și, indirect, activarea canalelor de K^+ dependente de ATP (K_{ATP}), prin creșterea concentrației intracelulare de cGMP (vezi fig. 7.44).

Relaxarea endotelio-dependentă neatribuită NO sau PGI₂ poate fi mediată de metaboliți ai acidului arahidonic produși pe calea ciclocrom P-450 monooxidazei. Aceasta generează EET, cu efect relaxant, și acizi hidroxicoisatrienoici, care determină contracția miocitului neted vascular. EET (5,6-EET; 8,9-EET; 11,12-EET și 14,15-EET) sunt produși de endoteliul vascular intact, determinând depolarizare și relaxare prin activarea K_{Ca} .

Anandamida (canabinoid endogen) este un factor hiperpolarizant slab, ce determină relaxare endotelio-dependentă, de asemenea prin creșterea efluxului de potasiu. Canabinoizii endogeni, inclusiv aciletanolamida și 2-arahidonil-glicerolul, activează receptori canabinoizi din țesuturile nervoase și periferice. Anandamida exogenă, ca și delta-tetrahidrocannabinolul, determină vasodilatația arteriolelor cerebrale și din alte teritorii, dar, până în prezent, nu s-au acumulat date suficiente care să confirme rolul de EDHF al anandamidei de origine endotelială.

Unele specii reactive ale oxigenului (radicalul hidroxil sau peroxidul de hidrogen) sunt considerate factori hiperpolarizanți derivați din endoteliu, dar efectele lor sunt slabe comparativ cu ceilalți compuși descriși, iar superoxid dismutaza și catalaza au efect redus sau chiar nu au nici un efect asupra relaxărilor mediate de EDHF în diverse paturi vasculare. Apa oxigenată poate fi produsă la nivel endotelial sub acțiunea NOS, în condițiile decuplării dintre acțiunea sa enzimatică asupra argininei de producerea de NO, și a fost descrisă ca EDHF într-un număr de studii recente.

Orice efect de activare a efluxului de K^+ poate duce la o ușoară creștere locală a concentrației sale extracelulare, cu efect hiperpolarizant conform ecuației Goldman aplicată pentru membrana miocitului neted. Există un număr de teritorii vasculare la diverse mamifere unde K^+ de origine endotelială poate fi considerat EDHF.

Endotelina. Endotelina (ET) sunt peptide vasoconstrictoare de origine endotelială; celulele endoteliale vasculare produc numai ET1. Producția de ET1 este reglată de numeroși factori: forțele tangențiale datorate fluxului sanguin și întinderea peretelui vascular prin presiunea sanguină. Producția bazală de ET este stimulată de diverși factori chimici: adrenalina, angiotensina II, vasopresina, trombina, interleukina 1, ionoforul de calciu A23187.

ET produce o varietate de efecte în organism. La nivelul aparatului cardio-vascular determină vasoconstricție prin acțiune directă asupra mușchiului neted, dar și vasodilatație endotelio-dependentă (autocrin), efecte inotrop pozitive, cronotrop pozitive și bronhoconstrictoare. ET este un foarte puternic constricator al mușchiului neted, dar induce și proliferarea mușchiului neted vascular. Efectele vasoconstrictoare ale endotelinei sunt dublate de natriureză, ca urmare a inhibiției transportului activ de sodiu la nivelul tubulilor uriniferi. În felul acesta, endotelina pare să participe la reglarea presiunii arteriale pe cale dublă, atât vasculară, cât și volemică.

ET1 este compusă din 21 de aminoacizi (2 492 Da) și este sintetizată inițial ca un precursor peptidic lung, pre-proendotelina. ET1 finală se formează din precursorul polipeptidic (203 aminoacizi) pe o cale proteolitică (endo- și carboxipeptidaze) specifică pentru ET1 și izopeptide, ce conduce mai întâi la un intermediar de 39 de aminoacizi (big ET1). Astfel, după îndepărtarea semnalului peptidic, rezultă pro-ET1, procesat de o convertază pentru a produce big ET1. Acesta este clivat de o endopeptidază (enzima de conversie a ET, o protează neobișnuită, care poate fi o metaloproteinază neutră asociată cu plasmalema), rezultând ET1.

S-au descris câteva subtipuri de receptori pentru ET. Primul (ET_A ; A de la aortă) are o afinitate mai mare pentru ET1 și ET2 decât pentru ET3, iar al doilea (ET_B ; B de la bronhii) are aceeași afinitate pentru diferitele ET. ET_A este prezent în celulele musculare netede vasculare sugerând că ET1, care se leagă de receptorii din aceste celule, acționează ca un regulator local al homeostaziei cardio-vasculare. Acești receptori fac parte din familia receptorilor cuplați cu proteine G.

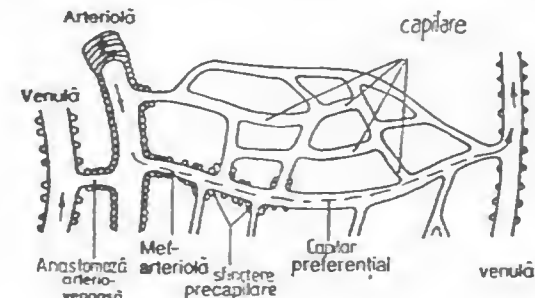
În patul vascular, ET_A de la nivelul celulelor musculare netede mediază contracția, pe când ET_B există în celulele endoteliale și mediază eliberarea de factori relaxanți, cum ar fi NO și PGI_2 . ET_B se găsește la nivelul endoteliului și mediază eliberarea de factori relaxanți. ET_{B2} se găsește la nivelul mușchiului neted și mediază contracția. Un alt tip de receptor pentru ET (ET_C) are afinitate mare pentru ET3, dar redusă pentru ET1 și 2 și nu a fost detectat în țesuturile de mamifer.

7.4. CIRCULAȚIA CAPILARĂ

Capilarele reprezintă segmentul intermediar al arborelui vascular situat între artere și vene, cu rol esențial în asigurarea schimburilor lichidiene, nervoase și nutritive tisulare. Împreună cu arteriolele din care derivă și venulele cu care se continuă, ele formează patul vascular terminal al microcirculației, cu particularități structurale și funcționale.

Cele trei componente ale patului vascular terminal constituie o veritabilă unitate funcțională a microcirculației care asigură adaptarea fluxului sanguin și schimburilor lichidiene arterio-capilare la necesitățile variabile ale circulației locale.

Fig. 7.45. Patul vascular terminal.



Venulele, participând împreună cu capilarele la schimburile lichidiene ce au loc între sânge și lichidul interstițial, contribuie la realizarea atât a suprafeței mari de contact dintre cele două medii, cât și a timpului necesar efectuării acestora.

7.4.1. PARTICULARITĂȚI MORFO-FUNCȚIONALE ALE CAPILARELOR

Structură. O primă particularitate a capilarelor o constituie faptul că nu prezintă mușculatură netedă. După descoperirea lor de către Malpighi (1661), au început să apară date morfologice care atrăgeau atenția, într-un prim moment, asupra structurii microscopice diferite a vaselor. Ulterior, s-a precizat că, pe măsură ce se ramifică și și reduc diametrul, arteriolele conțin mușculatură netedă din ce în ce mai redusă. La nivelul metarteriolelor apar discontinuități ale acestora, care sfîrșesc în teritoriul precapilar cu un veritabil sfîncter muscular (fig. 7.45).

Sistemul arterial se ramifică repetat, rezultând mai mult de 40 de miliarde de capilare. Capilarele reprezintă un sistem de legătură între circulația arterială și cea venoasă și fac parte din sistemul vascular de joasă presiune, alături de circulația venoasă, pulmonară și limfatică. Pe lângă asigurarea schimburilor nutritive, în condiții bazale și de activitate, rolul circulației capilare cuprinde și aspecte particulare, cum ar fi implicarea în termoreglare. Capilarele sistemice conțin 5-7% din volumul sanguin total și asigură schimbul permanent de apă și ioni între spațiul intravascular și cel interstițial, având un rol esențial în mecanismele homeostaziei hidroelectrolitice.

Particularitățile morfo-funcționale ale circulației capilare (vezi fig. 7.46, 7.47) sunt subordonate funcției de schimb. Astfel, la o lungime individuală de ~0,6 mm și un diametru de 5-20 μm (mai subțiri la capătul arterial), suprafața totală de secțiune la nivel capilar este de aproximativ 4 000 cm², iar suprafața totală a peretelui capilar (1 μm grosime) este de ~6 300 m². Densitatea capilarelor este variabilă în funcție de țesut (6 000/mm³ în plămân, creier, glande endocrine; 5 000/mm³ în miocard; 400-3 000/mm³ în mușchi scheletic și picle), dar, în general, ficcare celulă se găsește la distanță maximă de 60-80 μm față de cel mai apropiat capilar.

Mai multe capilare rezultă dintr-o metarteriolă și sunt colectate de o venulă, în multe țesuturi capilarele având aspect de rețea anastomotică (fig. 7.46). Peretele muscular al metarteriolei este discontinuu, iar ultimul inel muscular se comportă ca un sfîncter precapilar (poartă de intrare). Venulele sunt vase mai largi decât arteriolele, cu perete muscular continuu. În rețeaua capilară există capilare adevărate, care prezintă sfîncter precapilar și canale preferențiale, lipsite de sfîncter precapilar. Aceste canale diferă de anastomozele arterio-venoase (șunturi), care au perete muscular. Anastomoze arterio-venoase, cu efect de scurtcircuitare a patului capilar, sunt prezente în pielea extremităților, tubul digestiv, plămân. În unele țesuturi (mușchi scheletic), nu sunt evidente căile de șunt, dar acest tip de circulație poate fi demonstrată, fiind numită șunt fiziologic. Cu alte cuvinte, sângele poate curge permanent din arteriolă spre venulă în perioadele de activitate metabolică

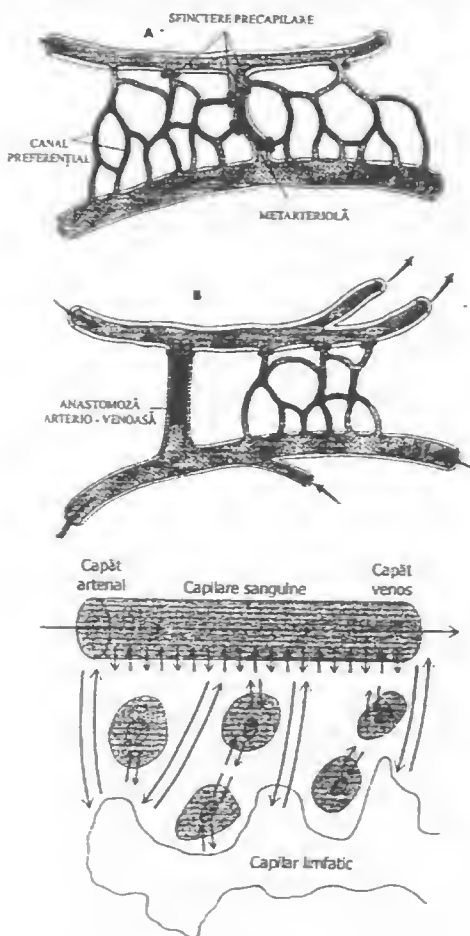


Fig. 7.46. Organizarea funcțională a rețelei capilare pentru asigurarea perfuziei tisulare și a schimburilor de substanță capilaro-tisulare.

În sectorul capilar, viteza de circulație este redusă (0,5–0,8 mm/s), datorită suprafeței totale de secțiune foarte mari în comparație cu sectoarele din amonte. Viteza mică facilitează schimburile transprietale. Rezistența mare la curgere (ramuri multiple, calibru foarte redus) determină o importantă cădere de presiune în acest sector. Presiunea intracapilară este în segmentul arterial de 35–36 mmHg, în cel intermediar de 25 mmHg, iar în cel venos de 10–12 mmHg (valori determinate prin cateterism, metode izovolumetrice/izogravimetrice).

redusă, când multe sfinctere precapilare sunt închise, reprezentând o sursă imediată de sânge în caz de necesitate. Circulația prin capilarele adevărate fiind subordonată necesităților metabolice tisulare, mai este numită și circulație outritivă, în opoziție cu cea numită non-nutritivă, care șuntează patul capilar.

7.4.1.1. Curgerea sângelui în capilare

Curgerea sângelui printr-un capilar este determinată de presiunea arterială și de controlul local, dar, în ultimă instanță, de sfincterul precapilar. Doar 5–10% din capilare sunt deschise în mușchiul scheletic în repaus. În general, în comparație cu arterele, curgerea în capilare este lentă, nu prezintă fluctuații sistolo-diastolice de presiune și debit și este separată într-un șir central de hematii și un strat circular periferic de plasmă.

Intermitența perfuziei unui anumit capilar este determinată de vasoșmoia prezentă la nivel arteriolar, care condiționează tootul sfincterului precapilar. Datorită proceselor de vasoșmoie are loc o închidere și deschidere ritmică a capilarelor (frecvența de deschidere/inchidere a capilarelor în stare de repaus este de 6–12/minut), astfel încât numărul de capilare deschise (irigate) depinde de activitatea țesutului perfuzat, cu o repartitie diferențiată în același organ. Aceste modificări în debitul sanguin capilar sunt aproape distribuite neregulat, dar sunt ritmice și organizate. La nivelul mușchiului scheletic în repaus densitatea capilarelor deschise este de 200–300/mm², iar în activitate poate deveni de 10 ori mai mare.

Vasoșmoia metarteriolară este legată de curgerea în ansamblul teritoriului deservit, nefiind niciodată suficient de intensă pentru a opri complet curgerea sângelui în porțiunea respectivă de țesut, pe când vasoșmoia sfincterului precapilar poate opri complet perfuzia capilarului respectiv. Modificările presiunii transmurale condiționează statusul contractil al vaselor precapilare, astfel perfuzia capilarelor fiind corelată cu fenomenul de autoreglare, mai precis cu mecanismele sale miogene.

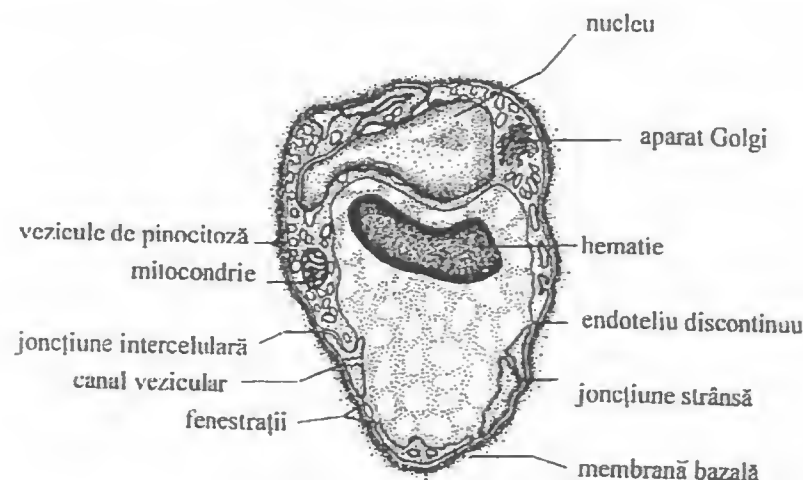


Fig. 7.47. Secțiune transversală prin capilarul sanguin.

Curgerea sângelui continuă să fie slab pulsatilă în segmentul arterial al capilarului (puls capilar), dar este continuă în capilarul propriu-zis și segmentul venos. În ce privește presiunea capilară efectivă, când metarteriola și sfincterul capilar sunt închise, presiunea este influențată de suprafața mare de secțiune a versantului venos (număr de capilare venoase mai mare decât al capilarelor arteriale).

Presiunea cu care sângele circulă în teritoriul capilar variază, de asemenea, la nivelul celor două segmente. Folosindu-se metoda directă a puncționării capilarului cu ajutorul unei micropipete conectate la un manometru cu mercur, s-a constatat că presiunea sanguină capilară este de 35–36 mmHg la nivelul patului arterial și scade la 10–12 mmHg în teritoriul său venos.

Determinarea cu ajutorul metodelor indirecte, bazate pe măsurarea presiunii necesare colabării patului capilar, dă valori ceva mai mici decât cele obținute cu metodele directe. Aceste valori variază în plus sau în minus, după cum capilarele se găsesc în stare de dilatație sau constricție. Dilatația capilară produsă fie de iritația locală prin mecanismul reflexului de axon, fie de creșterea temperaturii mediului ambiant, se însoțește de mărirea atât a presiunii cât și a vitezei de scurgere a sângelui capilar. Uneori poate apărea o veritabilă puls capilar, care capătă o semnificație semiologică deosebită în anumite boli, cum este cazul insuficienței aortice.

7.4.1.2. Structura peretelui capilar

Peretele capilar (fig. 7.47) este alcătuit dintr-un epiteliu unistratificat pavimentos (celule plate așezate pe o membrană bazală). Faja luminală (vasculară) a endoteliului capilar prezintă un glicocalix membranar dezvoltat (un strat de polizaharide gros de 50 nm, ce se continuă și la nivelul porilor intracelulari). Această căptușeală glicoproteică are efect asupra permeabilității peretelui capilar, conținutul veziculelor de pinocitoză, precum și asupra hemodinamicii capilare. Ea deține, de asemenea, un rol proeminent în fenomenele de aderare a elementelor figurate la peretele capilar.

Grosimea foarte redusă a peretelui permite difuziunea într-un timp scurt, favorizând schimburile capilaro-tisulare. Datorită suprafeței totale de secțiune foarte mari, viteza de circulație a sângelui este

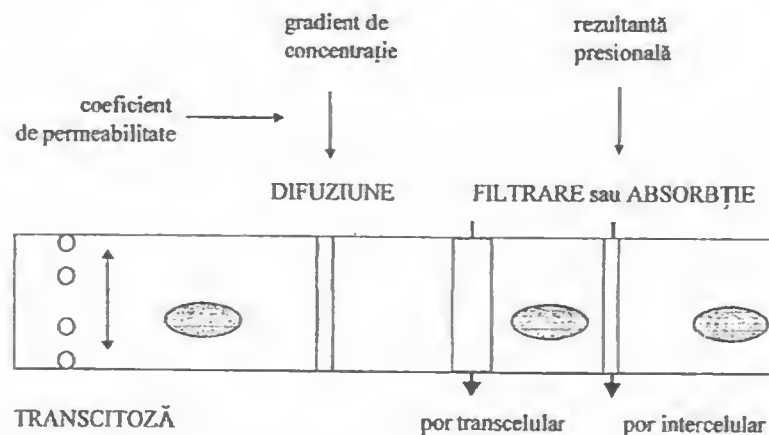


Fig. 7.48. Modalități ale transferului de substanțe prin peretele capilar.

scăzută. Astfel se asigură o durată mare de contact al sângelui cu celulele endoteliale (~3 secunde), care facilitează schimburile transporționale. Există fibre contractile intracelulare, a căror contracție determină modificarea formei și volumului celulelor endoteliale, dar nu există dovezi privind implicarea acestor fenomene în reglarea fluxului sanguin la nivel capilar, ci doar a permeabilității peretelui capilar. Membrana bazală, o matrice mucopolizaharidică amorfă, prezintă collagen nefibrilar și aspect poros.

Stratul endotelial poate fi continuu, fără canale intercelulare, ca în sistemul nervos central, sau poate prezenta pori cu diametru de ~4 nm (maxim 10 nm), ca în mușchi, țesutul adipos, plămân. În capilarele „fenestrate” (rinichi, intestin, glande endocrine, ficat), porii intercelulari sunt largi, de 20–100 nm (600–3 000 nm în ficat), acoperiți cu o membrană mucoproteică (continuă sau cu pori centrali cu radiații). În unele organe (ficat, măduvă hematogenă, splină), aceste „ferestre” sunt atât de largi, încât capilarele au aspect sinusoid. Astfel, capilarele se pot clasifica pe baza discontinuităților endoteliale (fenestrații) și a acoperirii cu membrană bazală și structuri perivasculară (tabelul 7.III).

TABELUL 7.III

Caractere morfologice ale peretelui capilar în diverse țesuturi

	Pori endoteliali	Membrană bazală	Înveliș pericapilar
Mușchi scheletic, cord, plămân, tegument	înguști	continuă, bine reprezentată	bogat
Intestin	largi	continuă, slab reprezentată	redus
Ficat, splină, măduvă osoasă	largi	discontinuu, slab reprezentată	nesemnificativ

Permeabilitatea peretelui capilar privit ca o membrană filtrantă poate fi cuantificată ca și conductanța hidrostatică, prezentând variații considerabile de la un țesut la altul (tabelul 7.IV).

TABELUL 7.IV

Conductanța hidrostatică a peretelui capilar

Creier	Piele	Mușchi scheletic	Plămân	Cord	Mucoasă intestinală	Glomerulul renal
3	100	250	340	860	13 000	15 000

Porii peretelui capilar. Se consideră că schimbul de molecule lipofobe (glucoză, electroliți, aminoacizi etc.) are loc prin pori hidrofilici asociați cu spațiile intercelulare. Aceste spații de ~20 nm prezintă zone de îngustare, unde celulele alăturate vin în contact incomplet, joncțiunile fiind străbătute de pori de ~4 nm (maxim 8–9 nm), cu excepția capilarelor de la nivelul masei cerebrale. Acești pori intercelulari permit schimbul rapid, prin difuziune, al substanțelor cu masă moleculară sub 10 kDa. Ei sunt însă rari, reprezentând doar ~0,02% din suprafața peretelui capilar.

Pe lângă acești pori mici, mai există unii mai largi, de ~25 nm, asociați cu capătul venos al capilarului, ce nu contribuie însă semnificativ la schimbul de molecule mici datorită densității reduse (de 30 000 ori mai mică decât a porilor mici), dar sunt o cale de acces pentru molecule mari, cum ar fi albumina. La nivel de intestin, nefron, glande endocrine, plexuri coroide, se găsesc capilare fenestrate. Fenestrațiile pot fi considerate pori giganti (20–100 nm), cu contribuție marcantă la permeabilitatea peretelui capilar, ce atinge valori extreme la nivel hepatic, unde endoteliul este de fapt discontinuu.

O varietate de substanțe intervin în dinamica porilor transcapilari, o importanță deosebită având calciul, bradikina, histamina.

7.4.1.3. Transportul de substanțe prin peretele capilar

Schimburile transcapilare de substanțe se pot realiza prin: difuziune, filtrare/reabsorbție, transcitoză (fig. 7.48). Procesele de difuziune interesează mai ales porii, în cazul apei și al substanțelor hidrofile, și se realizează transmembranar în cazul substanțelor lipofile. Prin procesul de diapedeză, elementele figurate pot trece din lumenul capilar în interstițiu, precum și din locul de formare în capilare. În mod normal, mișcarea prin peretele capilar a apei și substanțelor dizolvate se face în mică măsură prin filtrare și absorbție (~0,06 ml/100 g țesut/min) și în cea mai mare parte prin difuziune (~300 ml/100 g țesut/min).

Schimbul de substanțe prin transcitoză. Microscopia electronică evidențiază o abundență de vezicule de 50–80 nm la nivelul endoteliului, multe fiind atașate de invaginații membranare cu diametrul de până la 40 nm. Aceste vezicule de pinocitoză sunt implicate în schimbul de substanțe lipofobe cu moleculă mare (>30 nm), de tipul albuminei și fibrinogenului, conținutul vezicular fiind parțial determinat

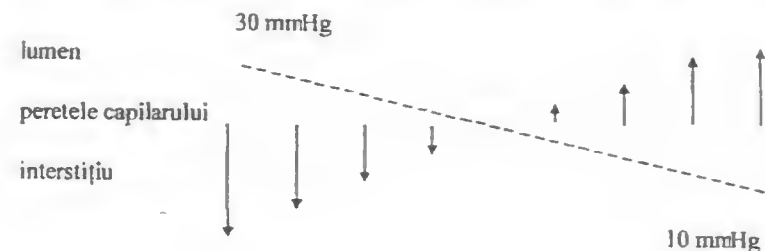


Fig. 7.49. Diagrama filtrării și reabsorbției de-a lungul capilarului în funcție de suma algebrică a presiunilor hidrostatice și oncotoice indicată prin săgeți, care se modifică pe măsura scăderii presiunii hidrostatice lumenale de la 30 mmHg la capătul arterial, la 10 mmHg la capătul venos al capilarului.

de pelicula mucoproteică de pe fața luminală a endoteliului. Veziculele de pinocitoză formate pe versantul luminal traversează celula (vezi fig. 7.47) și deversează conținutul pe versantul bazal. Vezicula nu este afectată pe acest parcurs, iar fenomenul poate avea loc și invers, înspre lumenul capilar.

Schimbul de substanțe prin difuziune. Difuziunea este mecanismul principal pentru schimbul de substanțe între plasma sanguină și lichidul interstițial, prin peretele capilar foarte subțire, care are și o enormă suprafață (datorită ramificării). Rata transferului de masă prin difuziune este de 80 de ori mai mare decât debitul plasmatic. Substanțele lipofile trec direct prin bistratul fosfolipidic al membranei celulelor endoteliale, la polul lor bazal și luminal. Substanțele hidrofile trec prin pori (localizați în spațiile intercelulare sau transcelulare) și căi transmembranare apoase (mai mici și mai selective). Pentru fiecare compus, rata de schimb depinde de coeficientul de permeabilitate.

Pe de altă parte, cuplul filtrare-reabsorbție reprezintă un mecanism de mișcare în masă a lichidului prin peretele capilar în funcție de gradientul presional (fig. 7.49) și se realizează exclusiv la nivelul porilor.

Principalii factori determinanți ai ratei de difuziune sunt reprezentați de diferențele de concentrație (spre exemplu: consum de O_2 /producție de CO_2) și suprafața de schimb. Ecuația Fick aplicată pentru difuziunea prin peretele capilar (în absența unui flux net de solvent transperietal) are forma $D = PA\Delta c/d$, unde D = rata de difuziune, P = coeficientul de permeabilitate, A = suprafața de schimb, Δc = diferența de concentrație, d = grosimea membranei. Suprafața efectivă de schimb este reprezentată de întreaga suprafață a peretelui capilar pentru substanțele liposolubile și doar de pori și alte căi apoase pentru cele hidrosolubile. Factorii majori de care depinde difuzibilitatea sunt mărimea moleculei și liposolubilitatea sa.

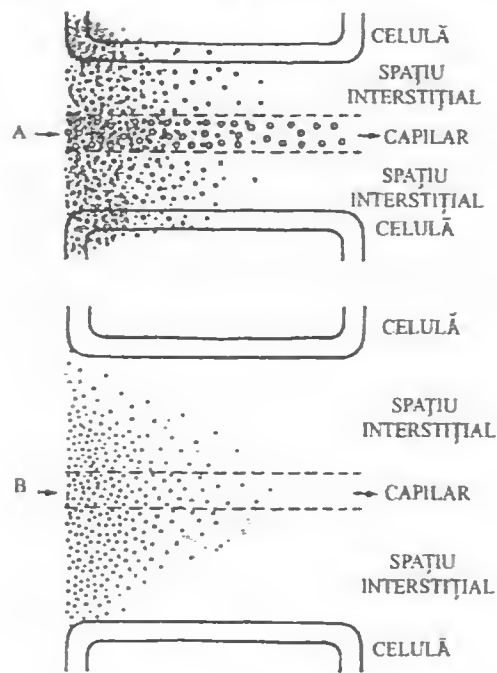


Fig. 7.50. Transferul de substanță prin peretele capilar, limitat de debit (A) și difuziune (B).

În cazul substanțelor hidrofile, trecerea făcându-se la nivelul porilor intra- și intercelulari, intervin și caracteristicile acestora. Dimensiunile porilor pot fi evaluate pe baza ratei de difuziune a unei molecule electroneutre, pentru care se cunoaște coeficientul de difuziune liberă. La această valoare se aduc corecții privind atracția exercitată asupra moleculelor de solvent („solvent drag”), interacțiunile dintre moleculele substanței respective (forțe interionice), configurația porilor, interacțiunile electrostatice ale ionilor cu suprafața porilor etc. Pentru molecule mici (uree, glucoză, apă, sodiu, clor), porii peretelui capilar impun restricții minore (coeficient mic de reflexie; 0 pentru apă, 1 pentru albumină). Difuziunea devine minimă la mase moleculare peste 60 kDa.

Dacă am nota cu 1 permeabilitatea porilor capilari pentru apă, a cărei masă moleculară este 18, atunci trecerea prin membrană a glucozei, cu masă moleculară 180, ar reprezenta 0,6, iar a insulinei (5 kDa) ar fi de numai 0,2. În cazul albuminei (60 kDa), permeabilitatea ar fi sub 0,0001, fapt ce explică incapacitatea proteinelor de a trece din plasma sanguină în interstițiu, cu menținerea unui conținut proteic de 7,3 g/dl în plasmă, față de 1,5–1,8 g/dl în interstițiu.

Așadar, pentru moleculele mici, singura limitare a ratei de difuziune este nivelul aportului sanguin (debitul). Se poate spune că difuziunea prin peretele capilar este, pentru aceste molecule mici, limitată de perfuzie, în cazul moleculelor mari schimburile fiind limitate de difuziune (fig. 7.50). Nu trebuie uitat faptul că difuziunea este un mecanism de transport la nivel molecular, bazat pe gradientul de concentrație, nefiind influențată de fenomenul macroscopic de filtrare sau reabsorbție.

Substanțele liposolubile trec direct prin plasmalema celulelor endoteliale, coeficientul de pariiție ulei/plasmă fiind un bun indicator pentru rata de difuziune a unei astfel de substanțe. Acesta este și cazul gazelor respiratorii. Astfel, aportul de oxigen la nivel celular nu este limitat de difuziune sau de numărul de capilare deschise. De altfel, în multe țesuturi, conținutul de oxigen al sângelui este deja scăzut la 80% la intrarea în capilar, ca urmare a difuziunii acestuia în țesut la nivel arteriolar. Acest fapt nu reflectă numai deplasarea oxigenului către destinația mitocondrială, ci și un fenomen de contracurent cu venulele din vecinătatea arteriolelor, precum și consumul de oxigen la nivelul țesutului vascular. În consecință, fenomenul de șunt arterio-venos prin difuziunea oxigenului poate deveni un factor limitant pentru aportul de oxigen la nivel tisular în condiții de debit sanguin redus.

Schimbul de substanțe prin filtrare-reabsorbție. La nivelul peretelui capilar, rata totală de transport net al apei prin filtrare este de 16 ml/min, mult mai mică decât debitul de schimb de 240 l/min realizat prin difuziune. Coeficientul mediu de filtrare este 6,67 ml/min/mmHg, sau, raportat la masa tisulară, 0,1 ml/min/mmHg/kg. Valoarea filtrării este 0,5% din volumul plasmăi, cu valori infime în creier și valori mult mai mari în ficat.

Eciliul Starling descrie presiunile hidrostatice (h) și coloidosmotice (o) care se sumează algebric, determinând presiunea efectivă pentru filtrarea lichidului din plasma sanguină în interstițiu în sectorul „arterial” al capilarelor și absorbția acestuia înapoi în plasmă în sectorul „venos” (tabelul 7.V). De menționat că toate presiunile participante rămân relativ constante de-a lungul capilarului, cu excepția presiunii hidrostatice intraluminală (vezi fig. 7.49), care scade de la capătul arterial spre cel venos, ca rezultat al curgerii sângelui împotriva unei rezistențe (legea lui Ohm).

Filtrarea este foarte variabilă în diversele teritorii vasculare și condiții fiziologice locale, datorită diferențelor de coeficient de filtrare, determinate de caracteristicile peretelui capilar, precum și datorită diferitelor presiuni de intrare, determinate de căderea de presiune în amonte. Dacă sfîncierul precapilar închide capilarul respectiv, presiunea hidrostatică intracapilară este dictată de cea venoasă (fig. 7.51). De asemenea, creșterea rezistenței în aval duce la creșterea presiunii intracapilare.

TABELUL 7.V

Eciliul Starling

Presiune (mmHg)	Zona arterială	Zona intermediară	Zona venoasă
luminală (h)	+30	+17,3	+10
interstițială (h)	+3	+3	+3
luminală (o)	-28	-28	-28
interstițială (o)	+8	+8	+8
Total	+13	+0,3	-7

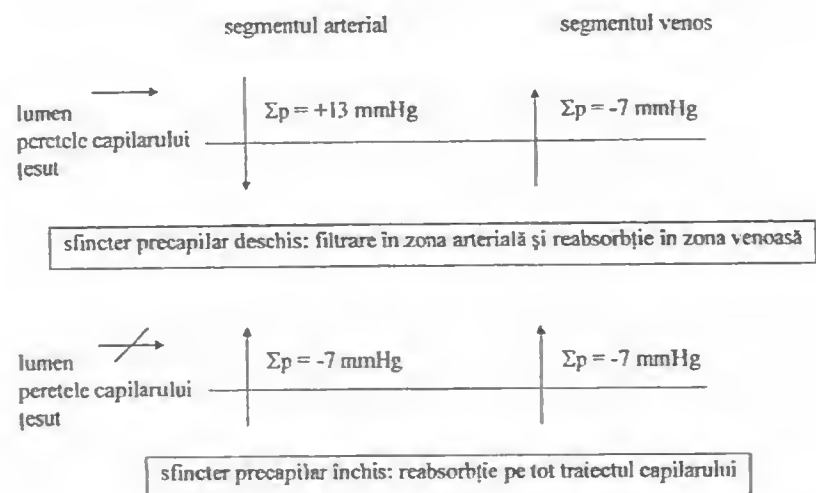


Fig. 7.51. Efectul închiderii sfincterului precapilar asupra proceselor de filtrare și reabsorbție prin peretele capilar.

Segmentul arterial al capilarului. Forța care realizează mișcarea soluției în afara capilarului: $-36,5 \text{ mmHg}$ ($P. \text{ sanguină} = 25 \text{ mmHg}$; $P. \text{ negativă interstițială} = -6,3 \text{ mmHg}$; $P. \text{ oncotică interstițială} = -5 \text{ mmHg}$). Forța care realizează mișcarea lichidului interstițial spre capilar: 28 mmHg ($P. \text{ oncotică} = 28 \text{ mmHg}$). Rezultanta este pozitivă ($8,3 \text{ mmHg}$), determinând filtrare.

Segment venos al capilarului. Forța care produce mișcarea lichidului interstițial spre capilar: -28 mmHg ($P. \text{ oncotică} = -28 \text{ mmHg}$). Forța care produce mișcarea lichidului interstițial în afara capilarului: $21,3 \text{ mmHg}$ ($P. \text{ sanguină} = 10 \text{ mmHg}$; $P. \text{ negativă interstițială} = 6,3 \text{ mmHg}$; $P. \text{ oncotică interstițială} = 5 \text{ mmHg}$). Rezultanta este negativă ($6,7 \text{ mmHg}$), determinând reabsorbție, ce reprezintă 9/10 din lichidul filtrat, restul de 1/10 revenind în circulație prin intermediul vaselor limfatice.

Presiunea hidrostatică la nivelul capilarului depinde de presiunile arterială și venoasă, precum și de rezistențele pre- și postcapilare. Astfel că o creștere a presiunii venoase influențează mai puternic presiunea în capilar decât o creștere similară a presiunii arteriale, datorită rezistenței scăzute în sectorul venos, care face ca $\sim 80\%$ din creșterea de presiune venoasă să se transmită la nivel capilar. În mod normal raportul celor două rezistențe este ~ 4 . Cu diferențe considerabile de la un pat vascular la altul, se poate considera că, în medie, presiunea hidrostatică la nivel capilar este de $30\text{--}32 \text{ mmHg}$ la capătul arterial și de $10\text{--}12 \text{ mmHg}$ la cel venos, cu o medie pe întreg patul capilar de $\sim 17 \text{ mmHg}$, exclusiv efectul diferențelor date de poziția față de cord. La intrarea în capilar, presiunea hidrostatică este suficient de mare pentru a determina un efect de filtrare a plasmelor prin peretele capilar, în condițiile în care presiunea hidrostatică din interstițiu este în mod normal nulă sau ușor negativă. Astfel (vezi fig. 7.51), când sfincterul capilar este închis, hemodinamica este influențată de presiunea venoasă și predomină fenomenul de absorbție ($P_{\text{cap}} = P_{\text{ven}}$), iar când sfincterul precapilar este deschis, predomină fenomenul de filtrare.

Acestei tendințe filtrante i se opune factorul coloidosmotic. Astfel, concentrația proteică mare a plasmelor în comparație cu interstițiul are un efect de retenție a apei în lumenul capilar. Presiunea coloidosmotică a plasmelor este de 28 mmHg ; 19 mmHg datorită proteinelor ($60\text{--}80 \text{ g/l}$) și 9 mmHg datorită cationilor suplimentari. Presiunea osmotică totală a plasmelor este de $\sim 6000 \text{ mmHg}$, în timp ce componenta

oncotică abia atinge $\sim 25 \text{ mmHg}$. Proteinele plasmatice nu pot părăsi lumenul, în timp ce apa, precum și electroliții și alte molecule mici difuzează prin peretele capilar. Cu alte cuvinte, permeabilitatea relativă a peretelui capilar față de apă și substanțele dizolvate determină presiunea osmotică efectivă. Presiunea oncotică reală poate fi definită ca $p = sRT(C_1 - C_2)$, unde s = coeficientul de reflexie, R = constanta generală a gazelor, T = temperatura absolută, C = concentrația substanței. Dintre proteinele plasmatice, albumina este cea mai importantă în determinarea presiunii oncotică.

Efectul osmotic predominant al albuminei, superior celui indicat de numărul de molecule și dependent nelinier de concentrație, poate fi explicat prin faptul că acesta este un polianion la $\text{pH} = 7,4$ și, deci, reține cationi (Gibbs-Donnan), efect suplimentat de adsorbția unui număr de anioni de clor pe moleculele de albumină. Calculele arată că albumina se comportă osmotic ca și cum ar avea o masă moleculară de 37 kDa , dar atunci ar pătrunde prin pori și nu ar avea efectul respectiv. Pe de altă parte, fără mecanismele menționate de potențare a efectului osmotic ar fi necesară o concentrație de $\sim 12 \text{ g/dl}$ pentru efectul oncotic de 25 mmHg (cu efect masiv asupra vâscozității). În sfârșit, mici cantități de albumină scapă din lumen în interstițiu, cu dezvoltarea aici a unei mici presiuni oncotică ($0,1\text{--}5 \text{ mmHg}$) (tabelul 7.VI).

TABELUL 7.VI

Contribuția proteinelor plasmatice la efectul oncotic

Proteina	Masa moleculară (kDa)	Concentrația (g/dl)	%
Albumină	69	3,5–5,0	65
Globuline	80–200	1,5–2,5	15
Fibrinogen	350–400	0,2–0,4	

Debitul de filtrare este $Q = k\Delta P$, unde k = constanta de filtrare a membranei capilare, iar ΔP = suma algebrică a factorilor presiionali. Dacă valoarea este pozitivă, se produce fenomenul de filtrare, iar dacă este negativă, cel opus, de reabsorbție. În unele capilare, cum sunt cele glomerulare, filtrarea se produce pe întreaga lor lungime, iar în altele, cum sunt cele din mucoasa gastrică, se produce numai absorbție. Mișcarea apei prin peretele capilar fiind relativ nerestricționată, procesele de filtrare și reabsorbție se produc sub acțiunea unor presiuni cumulate relativ mici. Din debitul plasmatic intracapilar numai $\sim 2\%$ suferă filtrare, reabsorbția făcându-se în proporție de $\sim 85\%$ prin capilarele sanguine și restul prin cele limfatice. În circulația pulmonară se produce absorbție pe tot parcursul capilarului, iar limfa se formează la acest nivel sub acțiunea unei mici cantități de proteine plasmatice care trece în interstițiu.

Coeficientul de filtrare capilară este factorul de proporționalitate (k) din formula debitului de filtrare $Q = kS\Delta P/\eta d$, unde S = aria de perete capilar disponibil pentru filtrare, d = grosimea peretelui capilar, η = vâscozitatea filtratului. Grosimea peretelui capilar și vâscozitatea filtratului fiind relativ constante, pot fi incluse în constanta de filtrare a membranei. Aria membranei filtrante fiind necunoscută, se exprimă rata de filtrare raportată la masa tisulară. Indiferent de țesut, coeficientul de filtrare nu este influențat de modificări fiziologice ale presiunii arteriale sau venoase, ori de variații de pH sau de presiune parțială a oxigenului sau bioxidului de carbon. Condițiile patologice în care apar astfel de modificări se însoțesc și de leziuni la nivelul peretelui capilar și astfel se explică asocierea lor cu creșterea permeabilității capilare. Coeficientul de filtrare poate fi utilizat pentru calcularea fracției de capilare deschise; creșterea filtrării se bazează pe fenomenul de recrutare a capilarelor. Dacă proteinele plasmatice sunt înlocuite cu un substituent echioncotic non-proteic, coeficientul de filtrare crește și se produce edem. Permeabilitatea normală poate fi restabilită de doar $0,2\%$ albumină, indicând că albumina legată la nivelul porilor endoteliali poate fi un determinant al funcționării acestora.

Rolul lichidului interstițial în schimburile de la nivel capilar. Prin interstițiu se realizează schimburile dintre sânge și celule. Acest spațiu se caracterizează prin: conductanță mare pentru apă (în funcție de conținutul în polizaharide), presiune hidrostatică cu implicații în mișcarea apei, presiune coloid-osmotică cu implicații în schimbul de substanțe, rol de sită moleculară.

Presiunea lichidului interstițial se poate determina direct cu dificultate, datorită spațiului deosebit de restrâns (sub $1 \mu\text{m}$); se utilizează capsule perforate sau micropipete. Mult timp s-a considerat că presiunea

hidrostatică interstițială este la nivelul de referință al presiunii atmosferice, dar se pare că există valori negative de 1-2 mmHg (maxim 6-7 mmHg). Deci, în interstițiu se dezvoltă o presiune negativă cu efect de atragere a apei și a substanțelor solvite din sânge. Presiunea negativă interstițială este realizată de drenajul limfatic permanent și este rezultatul interrelației forțelor ce se exercită de o parte și de alta a peretelui capilar. Presiunea interstițială într-un țesut depinde de volumul spațiului interstițial și de complianța acestui compartiment. Aceasta este redusă în condiții normale de încărcare cu lichid, astfel că scăderea volumului determină o scădere imediată de presiune, ce accentuează fenomenele de filtrare și reduce drenajul limfatic, cu restabilirea parametrilor inițiali. Fenomenul invers se produce în cazul unei mici creșteri de volum. La creșteri mai mari de volum, mai ales în țesuturile mai distensibile, complianța crește când presiunea depășește 0 mmHg favorizând edemul, adică acumularea de lichid cu creșteri mici de presiune.

Tonusul capilar. Este starea de semidistensie permanentă a capilarelor, întreținută pe cale nervoasă și umorală locală.

Componenta nervoasă este reprezentată atât de fibrele amielinice simpatico-parasimpatice de la nivelul metarteriolei și sfîcterului precapilar, cât și de filetele mielinice somato-senzitive, care asigură sensibilitatea nervoasă în teritoriile peri-, pre- și postcapilar. Capilarele propriu-zise, deși sunt lipsite de fibre nervoase, prezintă totuși variații importante de calibr, imprimate de modificările de presiune și flux sanguin de la nivelul metarteriolelor, venulelor și anastomozelor arterio-venoase. Variațiile pasive ale diametrului capilar depind însă de elasticitatea și extensibilitatea capilarelor, întreținute, la rândul lor, atât de metabolismul propriu al celulelor endoteliale, cât și de constituția plasmei sanguine și interstițiale. Dintre aceștia, cataboliții acizi și substanțele vasoactive, ca adrenalina și noradrenalina (vasoconstrictoare), histamina și plasmakininele (vasodilatatoare), afectează profund tonusul capilar și capilaromotricitatea în general.

Stimularea directă sau neuro-reflexă a elementelor contractile precapilare poate determina fie vasodilatația și creșterea fluxului sanguin în capilare, fie vasoconstricție arterială însoțită de scăderea cantității de sânge circulant prin teritoriul subiacent capilar.

Fenomenul de capilarodilatație apare evident atât în cazul dermatografismului, cât și al reacțiilor reflexe locale de axon, în care dilatația capilară reprezintă factorul determinant al congestiei și modificărilor de permeabilitate generatoare de edem local.

După 15-20 s de la aplicarea unui excitant dureros pe tegumente sau după simplul grataj al pielii, se produce tripla reacție locală de axon (hiperemie, edem, papulă), cunoscută sub numele de *triada Lewis*. La baza declanșării sale stă stimularea antidromică a filetelor senzitive din imediata vecinătate, cu participarea unei substanțe puternic capilarodilatatoare, de tipul histaminei, după unii autori, sau al derivaților de adenozină, după alții (fig. 7.52). Printr-un mecanism similar apar reacțiile urticariene, de intoleranță la frig, substanțe străine de origine medicamentoasă sau alimentară etc. Un aspect interesant legat de tonusul capilar îl reprezintă hiperemia reactivă, constantă după obstrucția de scurtă durată a circulației. La

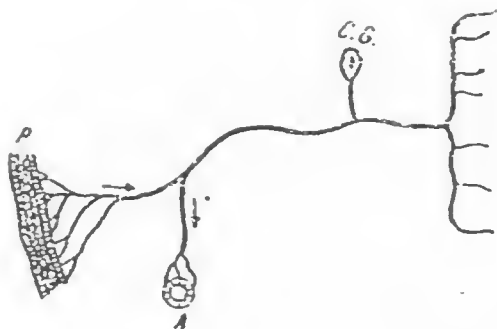


Fig. 7.52. Reflexul de axon. P, piele. A, arteriolă. C.G., corp celular.

aproximativ 10-15 s de la îndepărtarea garoului plasat pe un membru, apare o stare de congestie în segmentul subiacent obstrucției, determinată de cataboliții acizi acumulați în timpul întreruperii circulației. Hiperemia postobstrucțivă evidențiază rolul factorilor umorali locali la producerea modificărilor de tonus capilar. Atât dermatografismul, cât și hiperemia reactivă se utilizează ca teste de reactivitate vasomotorie.

7.4.2. REGLAREA CIRCULAȚIEI CAPILARE

Din cele de mai sus rezultă că reglarea circulației capilare se realizează, ca și la nivelul altor segmente ale sistemului vascular, pe calc dublă; nervoasă și umorală.

7.4.2.1. Reglarea nervoasă

Afectează indirect circulația capilară fie prin fibrele vegetative simpatico-parasimpatice de vecinătate, fie prin intermediul modificărilor de tonus arteriolar, sau cu participarea căii derivate arterio-venoase.

Prezența fibrelor vasoconstrictoare simpatiche la nivelul teritoriilor pre- și postcapilar (fig. 7.53) a fost pusă în evidență mai întâi de Cl. Bernard (1852) cu ajutorul experienței simple de secționare a lanțului simpatic cervical la iepure, urmată de capilarodilatație și creșterea fluxului sanguin în urechea de partea respectivă.

La rândul lor, filetele vegetative capilarodilatatoare aparțin fie parasimpaticului cranio-sacrat, pentru teritoriile capilare subordonate acestora, fie simpaticului colinergic, a cărui prezență a fost dovedită, din 1954, de Folkow și Uvnäs în diverse țesuturi și organe, inclusiv pielea.

În sens capilarodilatator acționează, după cum s-a văzut, și reflexele locale de axon, provocate de excitarea antidromică a filetelor senzitive terminale ale aceluiași neuron.

Reacțiile neuro-reflexe locale capilaromotorii sunt sub controlul permanent al centrilor vasomotorii medulari și bulbari, al căror tonus este întreținut de centrul cortico-diencefalic. De aici, reacțiile vasomotorii de origine centrală psiho-afectivă, de tipul eritemului pudic, palorii sau congestiei tegumentelor feței din timpul emoțiilor puternice etc.

7.4.2.2. Reglarea umorală

Spre deosebire de reglarea nervoasă de vecinătate, componenta umorală a reglării capilaromotricității influențează cu predominanță patul capilar propriu-zis. În afara mediatorilor chimici simpatico-adrenergici (adrenalina și noradrenalina) și colinergici (acetilcolina), prevăzuți cu acțiuni antagoniste, capilaroconstrictoare în primul caz și capilarodilatatoare în cel de al doilea, un rol deosebit în reglarea fluxului sanguin capilar

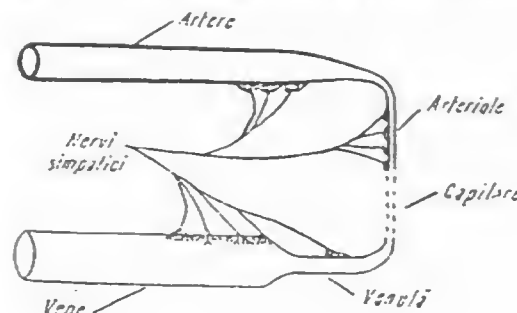
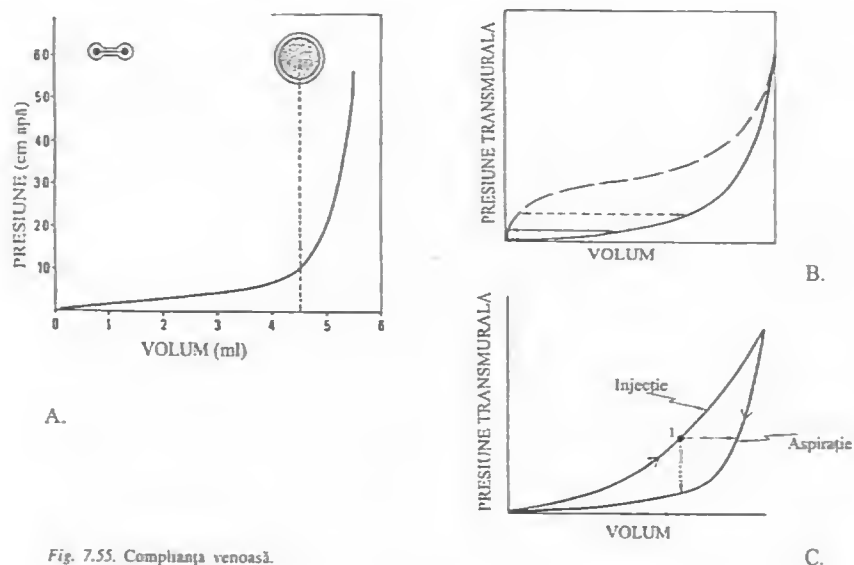


Fig. 7.53. Inervația simpatică a teritoriilor pre- și postcapilare.



Extensibilitatea sau distensibilitatea venelor este de aproximativ 6-10 ori mai mare decât a arterelor (o medie de 8 ori). Distensibilitatea totală, sau complianța, este creșterea maximă de volum determinată de creșterea presiunii. Cum volumul venelor este de 3 ori mai mare decât al arterelor, iar distensibilitatea depășește de 8 ori valoarea normală a acestora, complianța venoasă, ca produs dintre distensibilitate și volum, apare de 24 de ori superioară celei arteriale. Datorită diferenței de complianță a acestor două segmente vasculare, variațiile de volum se vor solda cu modificări mult mai mici ale presiunii cu care circulă sângele în vene decât în artere. În timp ce scăderea presiunii din vene cu 1 mmHg va fi urmată de creșterea presiunii arteriale cu 24 mmHg, ridicarea acesteia din urmă cu 1 mmHg va determina reducerea presiunii venoase doar de 1/24 mmHg. Venele, fiind capabile să depoziteze mari cantități de sânge fără modificări ale presiunii venoase, sunt numite și arii de depozit ale circulației. Gravitația exercită o presiune hidrostatică însoțită de distensia venelor situate sub nivelul cordului, în timp ce teritoriul venos de deasupra pompei cardiace este colabă în poziție ortostatică.

Venele destinate, supuse unui regim presional constant, posedă capacitatea de a se adapta la distensie, relaxându-se după un anumit timp. Această capacitate de relaxare tensională deține un rol major în stocarea sângelui sau a lichidelor perfuzate la nivelul organelor de depozit.

Într-o corelație cu extensibilitatea este elasticitatea venelor. Studiile asupra raportului volum-presiune au arătat că atunci când presiunea este zero, vena este practic colabată. Creșterea presiunii din interiorul venei este urmată de mărirea volumului acesteia și de trecerea de la starea colabată la o secțiune circulară a lumenului vascular. Elasticitatea venoasă devine evidentă din momentul când secțiunea a ajuns circulară și presiunea continuă să crească. Peste o anumită presiune, creșterile presionale vor produce creșterea mai lentă a volumului, în funcție de conținutul în fibre elastice al venei respective. În general, venele sunt mai extensibile decât arterele numai atunci când presiunea este joasă. Această condiție fiind îndeplinită de sistemul venos care funcționează în regim de joasă presiune se asigură distensibilitatea mai mare a venelor decât a arterelor.

Dacă presiunea externă este mai mare decât presiunea luminală, vena este aplatizată, curgerea făcându-se prin cele două porțiuni laterale cu aspect tubular rămase deschise (fig. 7.55 A). Pe măsura creșterii presiunii transmurale, forma secțiunii transversale se modifică spre elipsă și cerc, cu creșterea ariei corespunzătoare. Acest fenomen se reflectă în porțiunea plată a relației presiune-volum. La creșteri ulterioare de presiune transmurală (>10 cmH₂O), tensiunea parietală urmează legea Laplace pentru secțiune circulară, iar panta curbei presiune-volum este mult mai mare. De fapt, complianța venelor este mult mai mare la presiuni mici, datorită modificărilor descrise privind forma secțiunii (vezi fig. 7.55 A).

Relația volum-presiune este diferită în funcție de sensul de variație, deoarece în structurile vâsco-elastice distensibilitatea este în funcție de timp. Curba presiune-volum evidențiază fenomenul de histeresis (o parte din energie este înmagazinată în timpul distensiei și nu este recuperată în timpul revenirii venelor la dimensiunile inițiale). În cazul unei creșteri de volum rapide, presiunea înregistrează o creștere inițială, urmată de o scădere fără modificarea volumului, aspect numit fenomen de recuperare. În cazul distensiei venoase, la presiune constantă crește volumul, aspect numit fenomen de fluaj. Aceste aspecte sunt relevante pentru situații cum ar fi: perfuzia cu debit mare sau modificarea bruscă de poziție. Curba presiune-volum *in vivo* cu referire la injectarea de fluid și aspirarea de fluid evidențiază faptul că între cele două curbe energia este pierdută (fig. 7.55 C). Întreruperea injectării are drept consecință fie scăderea presiunii (fenomen de recuperare), fie creșterea volumului (fluaj). Deci, fenomenul de recuperare și fenomenul de fluaj reprezintă o traducere a forțelor vâsco-elastice din vene, ce determină fenomenul de histeresis.

Contractilitatea este cea de a doua proprietate a venelor, întreținută de prezența fibrelor musculare netede, mai ales la nivelul venelor de calibr mic și mijlociu. Tonusul venos se datorește inervației predominant simpatice a acestora și diversilor factori umorali excitatori și inhibitori ai contractilității musculaturii netede din vene. Variațiile de tonus la nivelul venulelor controlează rezistența postcapilară, ajustând împreună cu sfincterul arteriolar precapilar presiunea capilară. Controlul oerov și umoral al contractilității venoase asigură, prin intermediul modificărilor, de volum și presiune, stagnarea sau lansarea în circulație a unor mari cantități de sânge, cu răsunet corespunzător asupra homeostaziei circulației generale. Modificările de debit sanguin în funcție de diametru (conductanța) sunt, de asemenea, mai mari în cazul venelor decât al arterelor. Atât venoconstricția, cât și venodilatația modifică întoarcerea și presiunea venoasă centrală, cu răsunet asupra debitului cardiac.

Tonusul musculaturii netede influențează și distensibilitatea peretelui venos. Relația dintre volumul venos și presiunea venoasă evidențiază deplasarea curbei presiune-volum spre stânga pentru domeniul de presiune redusă, dar la valori mari curbele se reunesc (fig. 7.55 B). Astfel, pentru aceeași presiune se observă diferențe de încărcare cu sânge a sectorului venos, mai ales în partea medie a curbelor, adică, pentru aceeași presiune, cantitatea de sânge este net superioară în vasele cu perete relaxat. Pe de altă parte, constricția venelor destinate are un efect evident mai important în ce privește variația de volum, mobilizarea sângelui (în limitele de funcționare eficace a mușchiului neted).

7.5.2. FUNCȚIILE VENELOR

Principalul rol al venelor este de transport al sângelui deoxigenat, încărcat cu substanțe rezultate din metabolismul celular, de la periferie la inimă. Excepție fac doar venele pulmonare, care conduc spre cord uo sânge oxigenat la nivelul teritoriului alveolo-capilar.

Un al doilea rol al venelor este acela de depozit și rezervor sanguin. Dacă se introduc 1 000 ml ser intraarterial, numai 5-10% din cantitatea perfuzată rămân în circulația sistemică, restul fiind depozitat în sistemul venos. Datorită volumului și distensibilității venoase superioare arterelor, peste 75% din masa sanguină se găsește în vene (fig. 7.56). 70-75% din volemie se află în venele marii circulații (din care 50-80% în vene cu diametru sub 1 mm). Punctul hidrostatic indiferent este reprezentat de atrul drept, existând variații de presiune și de distribuție a sângelui în funcție de poziția corpului. Marile sectoare ale circulației venoase sistemice sunt: supradiaphragmatic, abdominal și al membrelor inferioare. În ortostatism,

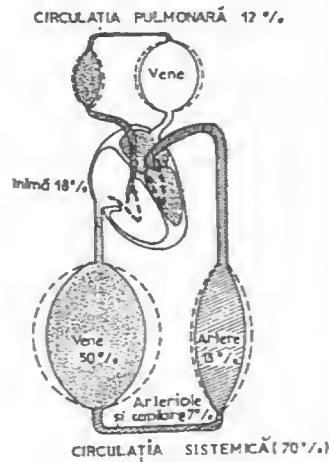


Fig. 7.56. Volumele de sânge din venele și arterele marii și micii circulații.

7.5.3. FACTORII ÎNTOARCERII VENOASE

Întoarcerea sângelui venos în atriul drept este rezultatul participării conjuncte a mai mulți factori, începând cu pompa cardiacă și sfârșind cu aspirația toracică și contracția musculară. Factorul determinant al circulației centripete venoase este reprezentat de gradientul presional existent între capătul periferic și cel central (cardiac) al sistemului venos, realizat prin mecanismul împingerii din urmă („vis à tergo”) a sângelui de către forța de propulsie restantă a cordului, printr-un sistem tubular cu suprafață de secțiune crescândă și rezistență la flux redusă. Presiunea venoasă este în poziție clinostatică de 12 mmHg, la extremitatea periferică a venelor, și de -1,5, -2 mmHg la nivelul auriculului drept, locul de vărsare a sângelui venos în cord. Deși diferența de presiune dintre cele două extremități ale sistemului venos este mică, în comparație cu cea din teritoriul arterial, ea este suficientă pentru a asigura, împreună cu factorii adjuvanți ai întoarcerii venoase, deplasarea centripetă a sângelui spre inima dreaptă.

Ca factori adjuvanți ai întoarcerii venoase acționează în sens „vis à fronte” aspirația cardiacă și toracică, presa abdominală, contracția musculaturii scheletice, forța gravitațională, valvulele venoase și tonusul capilar. Aceștia pot fi grupați în factori intravasculari și extravasculari. Din prima categorie face parte diferența de presiune sanguină dintre extremitățile sistemului venos realizate de către pompa aspiro-respingătoare cardiacă.

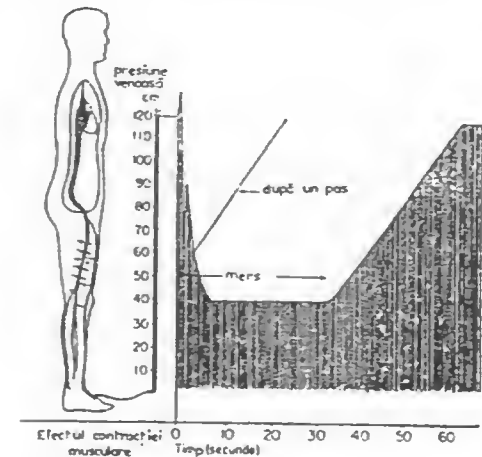
Pompa cardiacă reprezintă principala forță de care depinde întoarcerea venoasă, asigurând fenomenul de sucțiune realizat de coborârea planșeului auriculo-ventricular din timpul sistolei ventriculare și de vidul postsistolic. Cele două componente cardiace exercită rol de veritabilă pompă aspiratoare asupra coloanei de sânge din marile vene spre auricule, ca urmare a scăderii succesive de presiune, mai întâi auriculară și apoi ventriculară. Activitatea sistolo-diastolică cardiacă și, în special, cea a ventriculului drept favorizează întoarcerea venoasă grație scăderii postsistolice a presiunii atriale, realizând aspirația din față („vis à fronte”) a coloanei de sânge spre auricule. Beneficiarul principal este teritoriul venos al cavei inferioare, întrucât, la nivelul cavei superioare acționând gravitația, întoarcerea venoasă este mult ușurată.

sectorul supradiafragmatic se caracterizează prin presiune redusă, care scade cu înălțimea. Venele intracraniene (sinusuri venoase), acoperite de dura mater, prezintă calibrul invariabil, iar fluctuațiile de presiune sunt legate de presiunea lichidului cefalorahidian. În sectorul venos intratoracic au loc variații ale presiunii corespunzătoare ciclului respirator și modificărilor de poziție. În sectorul abdominal, volumul sanguin nu se modifică la schimbarea poziției. La nivelul membrelor inferioare, trecerea din clinostatism în ortostatism determină acumularea a 500 ml sânge subdiafragmatic, cu scăderea volumului în sectorul supradiafragmatic. Ca urmare a creșterii de presiune hidrostatică, debitul de filtrare capilar este mai mare decât reabsorbția capilară, determinând reducerea cu 5% a volumului plasmatic și creșterea corespunzătoare a hematocritului.

În timp ce arterele conțin doar 750 ml de sânge, venele depozitează cam 2 800-3 500 ml. Variații în plus sau în minus ale acestor valori pot apărea în funcție de gradul de extensibilitate și contractibilitate a sistemului venos. Creșterea presiunii venoase, care rezultă în urma unor astfel de variații, constituie principalul factor de mobilizare și activare a întoarcerii venoase, în cazurile de amenințare a echilibrului hemocirculator.

Dintre organele cu rol de rezervor sanguin, implicate în menținerea homeostaziei circulatorii, fac parte splina, ficatul, marile vene abdominale, plexul venos subcutanat și plexochimul pulmonar.

Fig. 7.57. Influența mersului asupra presiunii venoase în membrele inferioare.



Din cea de a doua categorie, a factorilor extravasculari, fac parte factorii modificatori ai presiunii transmurale și calibrului venelor, cum sunt aspirația toracică, pompa musculară, presiunea abdominală etc.

Aspirația toracică intervine în însoțirea prin mecanismul accentuării presiunii negative intratoracice. Presiunea intratoracică subatmosferică este un important factor favorizant al întoarcerii venoase. Valorile sale negative cresc de la -4 mmHg, în expir, la -8, -10 mmHg, în inspirul obișnuit, de repaus. Odată cu creșterea diametrelor toracelui în cele trei sensuri (longitudinal, antero-posterior și transversal) din timpul inspirului, presiunea negativă din cușca toracică accentuându-se determină disteozia venelor cave și a auriculului drept, cu pereții subțiri și depresibili, urmată de scăderea rezistenței la flux și activarea scurgerii sângelui venos de la periferie spre cord.

Expirul forțat cu gura închisă (manevra Valsalva), transformând presiunea intratoracică din negativă în pozitivă, reduce întoarcerea venoasă cu consecințe cardio-vasculare multiple (scăderea debitului bătăie, creșterea presiunii venoase periferice etc.).

Pe de altă parte, coborârea diafragmului în timpul inspirului apasă ca o presă asupra viscerelor abdominale și, prin intermediul acestora, asupra venelor din teritoriul splanhnic, forțând deplasarea sângelui spre atriul drept. Creșterea presiunii intraabdominale, dublată de scăderea presiunii intratoracice, realizează astfel o veritabilă pompă respiratorie.

Forța gravitațională acționează în poziție ortostatică numai la nivelul teritoriului situat deasupra atriului drept, la nivelul căruia presiunea este zero. Cu excepția venelor înconjurte de structuri rigide (sinusuri venoase cerebrale, vene vertebrale, hepatice, splenice), gravitația accentuează tendința de colabare a venelor. Efectul negativ al acesteia este contracarat în jumătatea inferioară a corpului de prezența valvulelor venoase și de contracția mușchilor scheletici.

Sistemul valvular este format din valvule în „cuib de rândunică”, dispuse la distanță de 5-7 cm una de alta, în vederea segmentării coloanei de sânge și anihilării tendinței sale la scădere și stagnare în venele membrilor inferioare. Degradarea sistemului valvular din segmentul inferior al corpului predispune la stază venoasă și varice, care adeseori se suprainfectează, dând naștere tromboflebitelor și ulcerelor varicoase.

Contribuția musculaturii scheletice deține, de asemenea, un rol important printre factorii adjuvanți ai circulației de întoarcere din porțiunea distală a corpului.

Prin compresia și masajul exercitat asupra venelor din teritoriul respectiv, contracția mușchilor striati împinge sângele numai în sens centripet spre venele mari și atriul drept, întrucât sistemul valvular se opune deplasării sale în sens invers. Datorită acestor efecte, contracția musculară mai este numită și pompă musculo-venoasă. Ea contribuie și la reducerea presiunii venoase în poziție ortostatică de la valoarea de 90 mmHg, în repaus, la 20-25 mmHg, în timpul activității musculare (fig. 7.57).

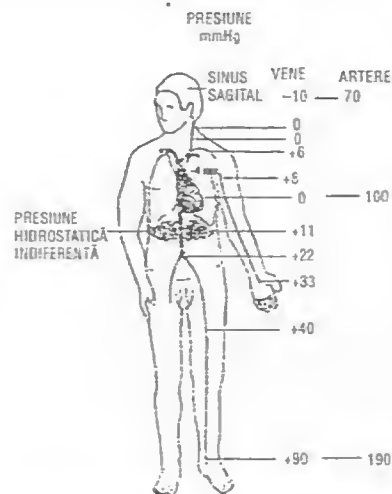


Fig. 7.58. Variațiile presiunii venoase în ortostatism.

rezistenței la scurgere. În poziție orizontală, paralel cu creșterea calibrului venelor, se constată scăderea presiunii, ajungându-se de la 12 mmHg, în cazul capilarelor venoase, la 7-8 mmHg, în venele mici, și la 3-4 mmHg, la nivelul venelor de calibr mijlociu. În venele mari și auriculul drept, presiunea sângelui atinge valori de 0 sau chiar negative, de -1,5, -2 mmHg, cu maxima de -4 mmHg în inspirul forțat (fig. 7.58).

În comparație cu presiunea venoasă centrală, presiunea venoasă periferică prezintă mari variații în funcție de teritoriul urmărit. În poziția verticală variațiile oscilează între -10 mmHg, în sinusul sagital, și +90 mmHg, la nivelul venelor plantare.

În mica circulație, presiunea venoasă variază în jurul valorii de 6-8 mmHg, la nivelul capilarelor pulmonare, și de 4-5 mmHg în auriculul stâng, deși presiunea sistolo-diastolică din artera pulmonară reprezintă doar a 6-a parte din cea existentă în antră (22/8 mmHg). Dintr-un alt punct de vedere, presiunea hidrostatică prezintă la nivelul teritoriului alveolo-capilar pulmonar valori inferioare presiunii colimnometrice, ceea ce face ca procesele de resorbție să predomină asupra celor de difuziune și, astfel, să se evite pericolul transsudatelor pulmonare în condiții normale.

În plus, mișcarea produsă de contracțiile musculare evită acumularea cataboliților acizi, precum și apariția edemelor și a fenomenului de nboșală. Pompa musculo-venoasă, reducând volumul de sânge din vene și acumulările tisulare de apă și cataboliți acizi, se comportă ca o inimă periferică.

Un ultim factor adjuvant al întăririi venase este tonusul capilar. Creșterea sa împiedică deplasarea sângelui din teritoriul arterial spre cel venos, reduce întăririi venase, iar scăderea tonusului capilar activează fluxul sanguin din artere spre vene. Una din primele dovezi experimentale ale activării circulației venase, prin mecanismul scăderii tonusului capilar, a fost adusă de Cl. Bernard (1852) pe urechea de iepure cu simpaticul cervical extirpat de partea respectivă.

Pulsajia arterelor poate, de asemenea, influența în oarecare măsură întăririi venase.

7.5.4. PRESIUNEA VENOASĂ

Presiunea cu care sângele circulă prin vene este dependentă de presiunea hidrostatică, dependentă la rândul ei de curgerea sângelui și de presiunea hidrostatică exercitată de masa sanguină asupra sistemului venos. Ea scade de la periferie spre venele mari și auriculul drept odată cu scăderea

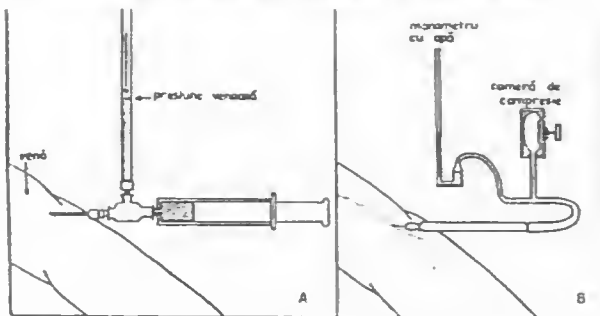


Fig. 7.59. Metode sângerânde de determinare a presiunii venoase.

Metodele de determinare a presiunii venoase sunt, ca și în cazul presiunii arteriale, de două feluri: directe și indirecte.

Primele, fiind metode sângerânde, prezintă avantajul preciziei și presupun puncționarea uneia din venele superficiale. Ca instrumente de măsură se folosesc fie manometre cu apă în tip Moritz-Tabora, fie flebomanometre cu capsulă aneroidă de tipul celui imaginat de Villaret (fig. 7.59).

În ambele cazuri, subiectul este așezat în poziția culcat pe spate, cu capul ușor ridicat și cu segmentul venos explorat la nivelul atriului drept, pentru a se evita reacțiile cardio-vasculare declanșate de stimularea zonei reflexogene tricuspidiene (reflex Bainbridge). Pentru determinarea presiunii venoase centrale se va recurge la cateterismul cardiac, completat cu măsurarea sau înregistrarea variațiilor de presiune din auriculul drept în timpul activității sale sistolo-diastolice.

Metodele indirecte au la bază principiul compresiei cu valoare cunoscută a uneia din venele superficiale, cu ajutorul unui manșon de cauciuc prevăzut cu un manometru cu apă în derivație (manometrul Recklinghausen). Presiunea de clabare a venei depinzând nu numai de factorul venos presional, ci și de consistența părții moi, determinarea indirectă este mai puțin exactă. Cu caracter orientativ poate servi însăși inspecția venelor dispuse la loc vizibil, cu presiune de peste 15 mmHg.

În general, presiunea venoasă periferică variază între 7-15 cm coloană de apă; valorile de peste 25 cm coloană de apă sunt patologice.

Variațiile presiunii venoase sunt fiziologice și patologice.

Creșteri fiziologice pot apărea în toate cazurile de activare a circulației, ca urmare a dilatației capilare și trecerii unei cantități mai mari de sânge din sistemul arterial spre teritoriul venos. Asemenea situații se întâlnesc, în primul rând, în efortul fizic de diferite grade, care, măbind afluxul venos, va crește și presiunea venoasă. În același sens vor acționa stările emoționale și fenomenele de predominanță simpatică, producătoare de vasoconstricție. Însăși trecerea de la clinostatism la ortostatism determină creșterea normală a presiunii venoase în jumătatea inferioară a corpului. Datorită greutateii și presiunii hidrostatice mari a sângelui, presiunea venoasă în membrele inferioare va urca în poziția bipedă până la valori de +90 mmHg. De aici, staza și edemele posturale la sedentari, precum și necesitatea mișcării, în vederea reducerii presiunii venase crescute cu ajutorul contracției musculare.

Ingestia exagerată de lichide, măbind masa sanguină, poate, de asemenea, determina creșterea tranzitorie a presiunii venoase.

Un loc aparte îl ocupă modificarea presiunii și întăririi venoase de cauză centrală. Creșterea presiunii intracranice, provocată de expirul forțat cu gura închisă (proba Valsalva), se însoțește atât de scăderea afluxului venos spre inima dreaptă, ca urmare a presiunii venoase crescute retrograd, cât și de reacții cardio-vasculare reflexe, reprezentate de tahicardie și hipotensiune.

Fenomenul apare în timpul eforturilor intense, de ridicare, împingere sau tragere, care necesită fixarea cuștii toracice și poate fi folosit la sportivi, ca mijloc de testare a gradului de adaptare la efort.

Creșteri patologice ale presiunii venoase se întâlnesc în insuficiența cardiacă, precum și în tumori, colecții, anevrisme și alte obstacole ale circulației venoase de întărire.

Insuficiența cardiacă, însoțindu-se de creșterea presiunii în auriculul drept și venele mari, produce stază venoasă, cianoză, edeme, hepatomegalie, puls jugular etc.

Scăderi ale presiunii venoase apar fie în caz de hemoragie, fie în stările de șoc, însoțite de trecerea unei părți din plasma sanguină în spațiile interstițiale prin exsplanism.

Pulsul venos reprezintă deformările pulsate determinate de variațiile de presiune venoasă, transmise retrograd de la nivelul auriculului drept la venele mari. Înregistrarea pulsului venos, denumită flebogramă, se face la jugulară, cu ajutorul unei capsule elastice Marey sau al celei fotoelectrice plasate deasupra fosei supraclaviculare. Subiectul este așezat în poziție culcat, cu extremitatea cefalică puțin deasupra punctului de referință reprezentat de valvula tricuspidă.

Înregistrând modificările presionale venoase concomitent cu manifestările mecanice, electrice și stetaustice din timpul diverselor momente ale revoluției cardiace, flebograma prezintă trei deflexiuni pozitive (a, c, v) și două negative (x, y) (fig. 7.60).

Semnificația fiziologică a undelor flebograme este următoarea:

— unda pozitivă a corespunde sistolei auriculare. Lipsa valvulelor între venele mari și atriul drept face ca creșterea presiunii auriculare să se transmită spre vena jugulară. Ca expresie a activității contractile a auriculului drept, deflexiunea a va avea o amplitudine proporțională cu presiunea intraatrială din timpul sistolei auriculare;

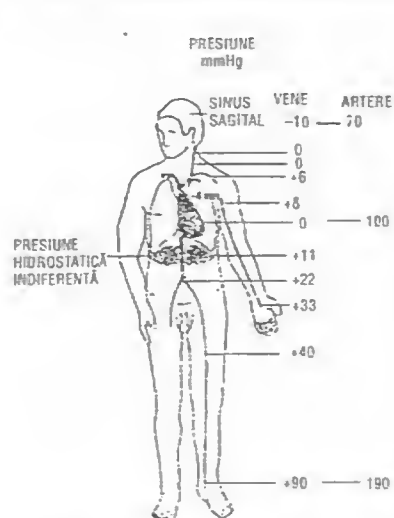


Fig. 7.58. Variațiile presiunii venoase în ortostatism.

rezistenței la scurgere. În poziție orizontală, paralel cu creșterea calibrului venelor, se constată scăderea presiunii, ajungându-se de la 12 mmHg. În cazul capilarelor venoase, la 7-8 mmHg, în venele mici, și la 3-4 mmHg, la nivelul venelor de calibr mijlociu. În venele mari și auriculul drept, presiunea sângelui atinge valori de 0 sau chiar negative, de -1,5, -2 mmHg, cu maxima de -4 mmHg în inspirul forțat (fig. 7.58).

În comparație cu presiunea venoasă centrală, presiunea venoasă periferică prezintă mari variații în funcție de teritoriul urmărit. În poziția verticală variațiile oscilează între -10 mmHg, în sinusul sagital, și +90 mmHg, la nivelul venelor plantare.

În mica circulație, presiunea venoasă variază în jurul valorii de 6-8 mmHg, la nivelul capilarelor pulmonare, și de 4-5 mmHg în auriculul stâng, deși presiunea sistolo-diastolică din artera pulmonară reprezintă doar a 6-a parte din cea existentă în artă (22/8 mmHg). Datorită acestui fapt, presiunea hidrostatică prezintă la nivelul teritoriului alveolo-capilar pulmonar valori inferioare presiunii colnidosmotice, ceea ce face ca procesele de resorbție să predomină asupra celor de difuziune și, astfel, să se evite pericolul transsudatelor pulmonare în condiții normale.

În plus, mișcarea produsă de contracțiile musculare evită acumularea cataboliților acizi, precum și apariția edemelor și a fenomenului de oboseală. Pompa musculo-venoasă, reducând volumul de sânge din vene și acumulările țesutului de apă și cataboliți acizi, se comportă ca o inimă periferică.

Un ultim factor adjuvant al întăririi venoase este tonusul capilar. Creșterea sa împiedică deplasarea sângelui din teritoriul arterial spre cel venos, reduce întărirarea venoasă, iar scăderea tonusului capilar activează fluxul sanguin din artere spre vene. Una din primele dinvizi experimentale ale activării circulației venoase, prin mecanismul scăderii tonusului capilar, a fost adusă de Cl. Bernard (1852) pe urechea de iepure cu simpaticul cervical extirpat de partea respectivă.

Pulsajia arterelor poate, de asemenea, influența în nărecare măsura întăririi venoase.

7.5.4. PRESIUNEA VENOASĂ

Presiunea cu care sângele circulă prin vene este dependentă de presiunea hidrostatică, dependentă la rândul ei de curgerea sângelui și de presiunea hidrostatică exercitată de masa sanguină asupra sistemului venos. Ea scade de la periferie spre venele mari și auriculul drept odată cu scăderea

Metodele de determinare a presiunii venoase sunt, ca și în cazul presiunii arteriale, de două feluri: directe și indirecte.

Primele, fiind metode sângerânde, prezintă avantajul preciziei și presupun puncționarea uneia din venele superficiale. Ca instrumente de măsură se folosesc fie manometre cu apă tip Moritz-Tabora, fie flebomanometre cu capsulă aneroidă de tipul celui imaginat de Villaret (fig. 7.59).

În ambele cazuri, subiectul este așezat în poziția culcat pe spate, cu capul ușor ridicat și cu segmentul venos exploatat la nivelul atriului drept, pentru a se evita reacțiile cardio-vasculare declanșate de stimularea zănei reflexogene tricuspidiene (reflex Bainbridge). Pentru determinarea presiunii venoase centrale se va recurge la cateterismul cardiac, completat cu măsurarea sau înregistrarea variațiilor de presiune din auriculul drept în timpul activității sale sistolo-diastolice.

Metodele indirecte au la bază principiul compresiei cu valoare cunoscută a uneia din venele superficiale, cu ajutorul unui manșon de cauciuc prevăzut cu un manometru cu apă în derivație (manometrul Recklinghausen). Presiunea de clabare a venei depinzând nu numai de factorul venos presional, ci și de consistența părții moi, determinarea indirectă este mai puțin exactă. Cu caracter orientativ poate servi însăși inspecția venelor dispuse la loc vizibil, cu presiune de peste 15 mmHg.

În general, presiunea venoasă periferică variază între 7-15 cm colnană de apă: valorile de peste 25 cm colnană de apă sunt patologice.

Variațiile presiunii venoase sunt fiziologice și patologice.

Creșteri fiziologice pot apărea în toate cazurile de activare a circulației, ca urmare a dilatației capilare și trecerii unei cantități mai mari de sânge din sistemul arterial spre teritoriul venos. Asemenea situații se întâlnesc, în primul rând, în efortul fizic de diferite grade, care, mărind aflusul venos, va crește și presiunea venoasă. În același sens vor acționa stările emoționale și fenomenele de predominanță simpatică, producătoare de vasoconstricție. Însăși trecerea de la clinostatism la ortostatism determină creșterea normală a presiunii venoase în jumătatea inferioară a corpului. Datorită greutății și presiunii hidrostatice mari a sângelui, presiunea venoasă în membrele inferioare va urca în poziția bipedă până la valori de +90 mmHg. De aici, staza și edemele posturale la sedentari, precum și necesitatea mișcării, în vederea reducerii presiunii venoase crescute cu ajutorul contracției musculare.

Ingestia exagerată de lichide, mărind masa sanguină, poate, de asemenea, determina creșterea tranzitorie a presiunii venoase.

Un loc aparte îl ocupă modificarea presiunii și întăririi venoase de cauză centrală. Creșterea presiunii intratoracice, provocată de expirul forțat cu gura închisă (proba Valsalva), se însoțește atât de scăderea aflusului venos spre inimă dreaptă, ca urmare a presiunii venoase crescute retrograd, cât și de reacții cardio-vasculare reflexe, reprezentate de tahicardie și hipotensiune.

Fenomenul apare în timpul eforturilor intense, de ridicare, împingere sau tragere, care necesită fixarea cuștii toracice și poate fi folosit la sportivi, ca mijloc de testare a gradului de adaptare la efort.

Creșteri patologice ale presiunii venoase se întâlnesc în insuficiența cardiacă, precum și în tumori, colecții, anevrisme și alte obstacole ale circulației venoase de întoarcere.

Insuficiența cardiacă, însoțindu-se de creșterea presiunii în auriculul drept și venele mari, produce stază venoasă, cianoză, edeme, hepatomegalie, puls jugular etc.

Scăderi ale presiunii venoase apar fie în caz de hemoragie, fie în stările de șoc, însoțite de trecerea unei părți din plasma sanguină în spațiile interstițiale prin exoplasmie.

Pulsul venos reprezintă deformările pulsatile determinate de variațiile de presiune venoasă, transmise retrograd de la nivelul auriculului drept la venele mari. Înregistrarea pulsului venos, denumită flebogramă, se face la jugulară, cu ajutorul unei capsule elastice Marey sau al celui fotoelectrice plasate deasupra fosei supraclaviculare. Subiectul este așezat în poziție culcat, cu extremitatea cefalică puțin deasupra punctului de referință reprezentat de valvula tricuspidă.

Înregistrând modificările presionale venoase concomitent cu manifestările mecanice, electrice și stetacustice din timpul diverselor momente ale revoluției cardiace, flebograma prezintă trei deflexiuni pozitive (a, c, v) și două negative (x, y) (fig. 7.60).

Semnificația fiziologică a undelor flebografice este următoarea:

- unda pozitivă a corespunde sistolei auriculare. Lipsa valvulelor între venele mari și atriul drept face ca creșterea presiunii auriculare să se transmită spre vena jugulară. Ca expresie a activității contractile a auriculului drept, deflexiunea a va avea o amplitudine proporțională cu presiunea intraatrială din timpul sistolei auriculare;

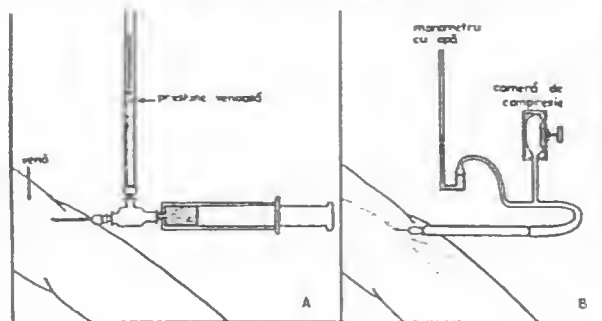


Fig. 7.59. Metode sângerânde de determinare a presiunii venoase.

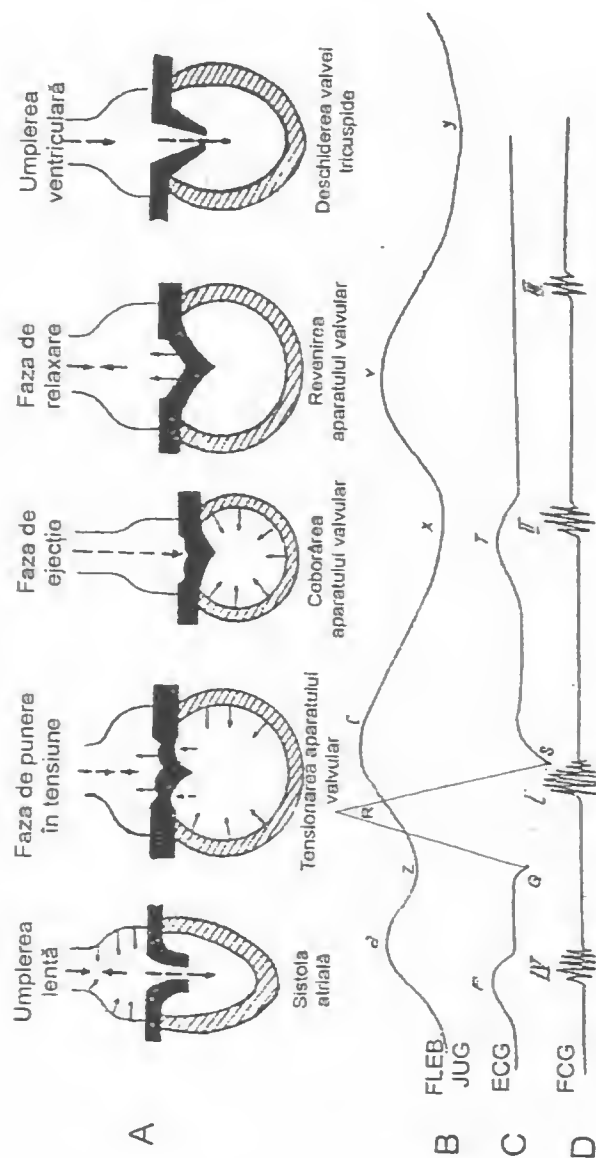


Fig. 7.60. Manifestări mecanice (A), flebografie (B), electrice (C) și stehistice (D) în timpul revoluției endiace.

— unda pozitivă c se datorește ridicării planșului atrio-ventricular în timpul sistolei izometrice ventriculare și bombării sale spre cavitatea atrială dreaptă;
 — deflexiunea următoare negativă, notată cu x, reflectă coborârea planșului atrio-ventricular în faza de contracție izotonică a ventriculelor, care, crescând volumul atrial, scade presiunea intraauriculară;
 — cea de a treia undă pozitivă, denumită v, se datorește revenirii planșului atrio-ventricular la începutul diastolei ventriculare, în faza de relaxare izometrică;
 — ultima deflexiune y este negativă și corespunde deschiderii valvei tricuspide și umplerii ventriculare postsistolică, însoțită de scăderea retrogradă a presiunii sângelui din atriu drept și vena jugulară.

În general, pulsul venos nu oferă indicații cantitative asupra ciclului cardiac. Unele informații pot fi obținute totuși cu privire la durata intervalului P-R sau a fazelor de umplere rapidă și lentă. Pentru aprecieri mai exacte este necesară înregistrarea simultană a pulsului arterial.

Există numeroase condiții patologice însoțite de modificări ale flebogramei. În fibrilația atrială, dispăre unda a datorită absenței unei sistole atriale eficace. În insuficiența tricuspidiană, unda a pare mai redusă, iar depresiunea x este redusă, dispăre sau este înlocuită de unda pozitivă R (de regurgitare), unda v fiind mai amplă; undele c, R, v se pot contopi într-o amplă undă pozitivă sincronă cu sistola ventriculară, iar depresiunea y este mai profundă decât normal. În stenoza tricuspidiană, unda a este mai amplă, unda c este mai scurtă, iar depresiunea y diminuează până la dispariție. În pericardita constrictivă unda a este mai amplă, iar depresiunea y este mai profundă și mai rapidă. În insuficiența cardiacă dreaptă și în cea globală unda a crește foarte mult, iar depresiunea y diminuează.

7.5.5. REGLAREA CIRCULAȚIEI VENOASE

Pentru a asigura un aport suficient de sânge la cordul drept în vederea realizării unui debit cardiac corespunzător nevoilor variabile ale organismului, întoarcerea venoasă este reglată și adaptată la necesități pe cale dublă, nervoasă și umorală.

Reglarea nervoasă asigură reacțiile venoase prompte, de natură simpatică în majoritatea cazurilor. În timp ce fibrele simpatico-adrenergice vasoconstrictoare sunt bine reprezentate la nivelul sistemului venos din întregul organism, parasimpaticul vasodilatator acționează doar în teritoriile cefalic și pelvin. Reacțiile neuro-reflexe vasomotorii sunt consecința stimulării baroreceptorilor de la nivelul zonelor reflexogene clasice (sino-carotidiană, endocardo-aortică, auricul drept etc.) și constau în descărcări predominant simpatice cu participarea centrilor vasomotori bulbari. Ca și în cazul arterelor, venele se contractă sub influența excitării nervilor simpatici și se dilată după simpatectomie. Răspunsul venos precedă pe cel arterial în momentul trecerii de la clino- la ortostatism, producând creșterea volumului sistolic și a debitului cardiac. În felul acesta, venomotricitatea reflexă îmbunătățește performanțele pompei cardiace, ca principală formă de adaptare a circulației la diversele solicitări loco-regionale sau generale. La reglarea circulației venoase locale participă în sens dilatator și reflexele antidromice de axon, provocate de stimularea fibrelor senzitive din teritoriul respectiv.

Factorii umorali vasoconstrictori și vasodilatatori sunt, în linii mari, aceiași pentru teritoriul venos și cel arteriolo-capilar. Excepție face doar histamina, care exercită proprietăți constrictoare la nivelul venulelor, predispunând la stază capilară. În rest, catecolaminele (adrenalina, noradrenalina), angiotensina și vasopresina acționează în sens vasoconstrictor, iar acetilcolina, cataboliții acizi (CO_2 , acid lactic), plasmakininele și prostaglandinele A și E produc efecte vasodilatatoare.

Cât privește serotonina, aceasta influențează diferit patul vascular, după cum este vorba de teritoriul cutanat sau splanhnic. În timp ce tegumentele feței reacționează prin capilare- și venodilație, organele splanhnice, și mai ales rinichiul, răspund printr-o puternică vasoconstricție generalizată, urmată uneori de ischemie și necroză. Ca și în celelalte segmente ale sistemului vascular închis, factorii de reglare umorală participă atât la menținerea tonusului bazal al venelor, cât și la producerea reacțiilor cardiocirculatorii adaptative cu participare venoasă, potențând și prelungind în timp efectele reglării neuro-reflexe.

7.5.6. TIMPUL DE CIRCULAȚIE

Deplasarea sângelui propulsat de cord se realizează cu viteze diferite în cele trei sectoare ale arborelui vascular. Timpul în care sângele străbate un anumit segment al aparatului cardio-vascular poartă numele de timp de circulație. Datorită vitezei de circulație de 2-3 ori mai mici în vene decât în artere și reducerii sale până la 0,5 mm/s în capilare, timpul de circulație depinde în mare măsură de sectoarele venos și capilar.

Dacă în capilarele venoase sângele circulă cu o viteză doar de 0,5-1 mm/s, la nivelul venei femurale atinge 62 mm/s, pentru ca în jugulara externă să depășească 215-253 mm/s. Viteza de circulație scade progresiv în teritoriul arterial de la cord spre periferie și crește în cazul întoarcerii venoase, pe măsură ce calibrul venelor este mai mare și mai aproape de pompa cardiacă centrală. Pentru aprecierea timpului de circulație parțială sau totală se folosesc metode subiective și obiective.

Primele au la bază utilizarea unor substanțe percepute de subiect sub formă de senzații specifice (dulce, sărat, amar etc.), în momentul în care au ajuns pe cale sanguină la nivelul organelor de simț respective. În acest scop, se pot injecta într-una din venele cotului soluții de zaharină, CaCl_2 sau decol, obținându-se informații asupra timpului de circulație braț-limbă, care este de 10-12 s. Pentru a obține indicații asupra timpului braț-plămân (normal: 6 s), se va folosi o soluție de eter.

De preferat sunt însă metodele obiective, care se bazează pe administrarea intravenoasă de coloranți, izotopi sau substanțe ce provoacă efecte evidente în anumite teritorii vasculare.

Decelând substanța radioactivă (^{131}I înglobat în RISA) sau colorantă în vena simetrică de la plica cotului, se poate aprecia timpul de circulație totală, care, în condiții normale, este de 24 s.

Pentru determinarea timpului braț-față se utilizează proba cu histamină, producătoare de roșeață a tegumentelor feței, sau testul cu lobelină, care declanșează reflexul de tuse în momentul ajungerii sale la nivelul sinusului carotidian. Intervalul dintre administrarea intravenoasă și apariția acestor modificări este de 12-14 s.

Timpul de circulație apare scăzut în efort și hipertiroidism și crescut în insuficiența cardiacă.

7.6. CIRCULAȚIA LIMFATICĂ

Sistemul limfatic este o cale derivată de drenaj a lichidului interstițial, care este în relație de schimb cu plasma la nivelul capilarelor sanguine, prin difuziune, dar și în masă, conform echilibrului Starling (filtrare la nivelul capilarelor arteriale și reabsorbție la nivelul capilarelor venoase). Elementele componente sunt: vase (capilare, vene, colectoare limfatice) și ganglioni limfatici. Limfa se formează din lichidul interstițial la nivelul capilarelor limfatice și este drenată prin vase de calibru din ce în ce mai mare, până în venele subclaviculare; la joncțiunea cu jugulara internă corespunzătoare; dreaptă, pentru canalul limfatic drept, ce transportă limfa din membrul superior drept și jumătatea dreaptă a capului, gâtului și toracelui (parțial); stângă, pentru canalul toracic, ce transportă limfa din restul corpului. Sunt lipsite de circulație limfatică țesuturile epitelial, osos, cartilagin, precum și sistemul nervos central. Jumătate din volumul lichidian ce constituie debitul de formare a limfei revine în circulația sanguină la nivelul ganglionilor limfatici. Aceste structuri se găsesc pe traiectul vaselor limfatice mari și au un rol complex în imunitate (fig. 7.61).

7.6.1. CAPILARELE ȘI VASELE LIMFATICE

Situate în apropierea capilarelor venoase, capilarele limfatice au aspect incipient, în fund de sac, sunt în număr mai mic decât capilarele sanguine și au diametrul mai mare (20-30 μm) decât acestea. Celulele endoteliale ce formează peretele unui capilar limfatic prezintă filamente citoplasmice contractile, sunt conectate prin rare joncțiuni intercelulare de tip aderent, dar nu prezintă joncțiuni strânse și sunt dispuse

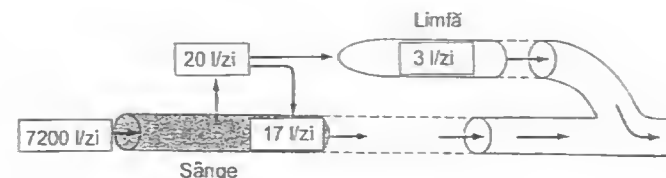
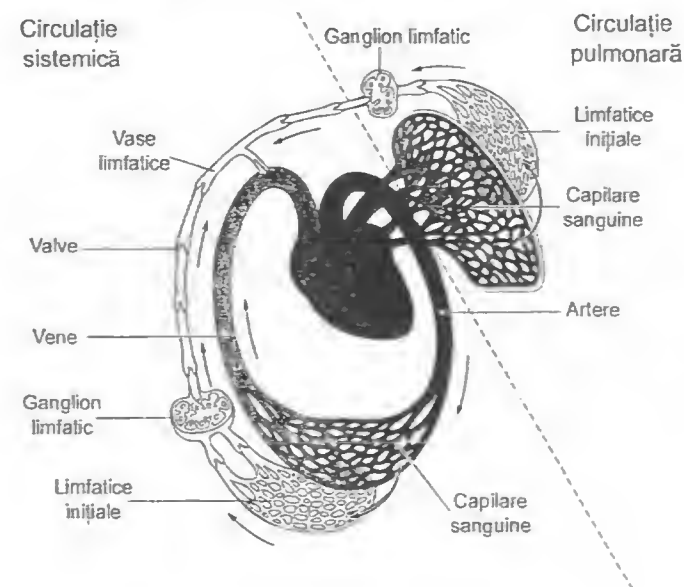


Fig. 7.61. Circulația limfatică, colaterală vasculo-imună a circulației sistemice.

parțial suprapuse (fig. 7.62), cu spații intercelulare de ordinul μm , realizând structuri de tip valvular, în care marginea celulei externe este ancorată în țesutul înconjurător prin legături cu fibrele de collagen. Această structură explică particularitățile funcționale. Ea permite drenarea de lichid interstițial și asigură permeabilitatea pentru moleculele mari. Dispozitivul valvular descris favorizează formarea limfei, fiind deschis când țesutul este destins prin acumularea de lichid interstițial și închis când presiunea din capilarul limfatic este superioară celei interstițiale.

Mușchiul neted din peretele vaselor limfatice asigură prin contractilitatea sa modificări de calibru și de presiune luminală, datorită prezenței de valvule (apropiate la vasele mici, depărtate la vasele mari), ce împiedică refluxul limfatic (vezi fig. 7.62). La traversarea ganglionilor, limfaticele prezintă numeroase anastomoze.

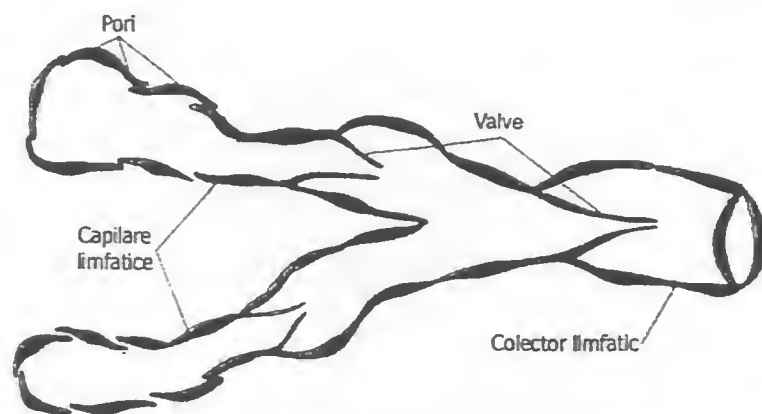


Fig. 7.62. Structura capilarelor și vaselor limfatice.

7.6.2. FORMAREA LIMFEI

Compoziția limfei prezintă caracteristici regionale în ce privește concentrația proteică, aceasta fiind în medie de 20 g/l, cu valori crescute în ficat (60 g/l și intestin 30–50 g/l). Concentrația de lipide este de 1–2% la nivel de canal toracic. Valorile pentru debitul limfatic de repaus sunt următoarele: canal toracic 100 ml/h; alte colectoare 20 ml/h; total 120 ml/h; 1/100 din debitul de filtrare la nivelul capilarelor arteriale; ~3,5 1/24 h (volumul plasmatic). Factorii care determină variabilitatea debitului limfatic includ: presiunea hidrostatică interstitală (între -6,3 mmHg și zero, debitul limfatic crește de 10 ori), creșterea presiunii sângelui capilar, scăderea presiunii oncotice a plasmăi, creșterea presiunii oncotice interstitală, creșterea permeabilității capilare. Rata de formare a limfei într-un țesut poate crește de 10–15 ori în condițiile în care se modifică raportul dintre presiunile transparențiale la nivelul capilarelor sanguine sau coeficientul de filtrare al peretelui, dar limfa este diferită în cele două cazuri, având concentrație mai mică decât de obicei în primul caz și mai mare în al doilea caz.

7.6.3. FACTORI DETERMINANȚI AI CIRCULAȚIEI LIMFATICE

Circulația limfatică este determinată de rata de formare a limfei din lichidul interstital, adică de pătrunderea lichidului interstital în interiorul capilarelor limfatice, fenomen guvernat de presiunile ce se exercită la acest nivel. La acestea se adaugă funcționarea capilarelor limfatice ca o pompă prin cuplul funcțional dintre fibrele mioendoteliale și dispoziția valvulară. Lichidul interstital pătrunde printre celulele peretelui capilar limfatic conform diferenței de presiune. Celulele endoteliale sunt atașate la țesutul înconjurător prin filamente de ancorare și nu sunt solidare între ele; marginile se suprapun, funcționând ca microvalve. Debitul limfatic total, de ~120 ml/h reprezintă ~10% din totalul ratei de filtrare capilară a

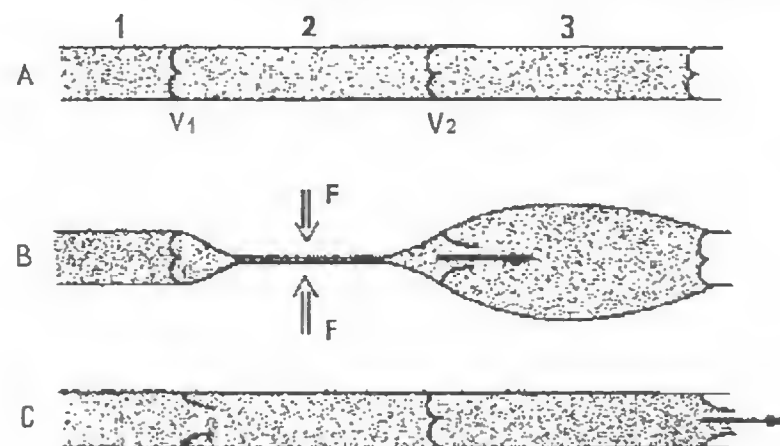


Fig. 7.63. Schema funcționării vaselor limfatice în regim de pompă segmentară.

plasmăi sanguine (1/100 din difuziunea plasmăi prin peretele capilar); în efort, debitul limfatic crește de 10–30 de ori. Debitul limfatic este determinat de presiunea interstitală; la căine crește de 12 de ori între -6 și 0 mmHg și de încă 7 ori între 0 și 1 mmHg, atingând valoarea maximă la ~2 mmHg (datorită compresiei tisulare asupra vaselor limfatice). Creșteri de presiune interstitală sunt determinate de creșteri ale presiunii capilare, ale permeabilității peretelui capilar, ale presiunii coloidosmotice interstitală, precum și de scăderea acesteia intracapilar. Vasele limfatice (fig. 7.63) acționează ca pompe segmentare (până la 25–50 mmHg, pe baza contracției mușchiului neted parietal (miogenă, determinată de distensie) și a valvelor prezente (la distanțe de câțiva mm în vase mari și chiar mai aproape în cele mici). Contracția segmentară a vaselor limfatice se produce la intervale neregulate de timp (de câteva ori pe minut), frecvența crescând cu creșterea presiunii. Prezența valvelor determină unidirecționalitatea fluxului limfatic și asigură coordonarea secvențială a contracțiilor miogene; contracția unui segment este urmată de distensia segmentului din aval, ce determină contracția acestuia (vezi fig. 7.63). Presiunea medie în vasele limfatice crește de la periferie spre centru, atingând 10 cmH₂O în limfaticile mari. Circulația limfatică este ajutată și de: contracția musculaturii scheletice, mișcarea segmentelor corpului, pulsațiile arterelor învecinate, compresii locale, precum și de contracția capilarelor limfatice, fiind influențată și de ciclul respirator.

7.6.4. ROLUL CIRCULAȚIEI LIMFATICE

Circulația limfatică asigură drenajul lichidului interstital, cu reglarea presiunii interstitală, precum și recuperarea de proteine, cu menținerea unei concentrații proteice scăzute în interstițiu. Fluxul limfatic este în funcție de proteinele filtrate. Insuficiența funcțională a circulației limfatice se manifestă prin edem (alb, moale, nedureros, generalizat). La nivelul ganglionilor limfatici se realizează o filtrare a particulelor mari (bacterii). Funcția principală a circulației limfatice este de readucere în circulație a excesului de lichid interstital și de transport al particulelor voluminoase (proteine: ~2 g/dl periferic, ~6 g/dl hepatic, ~4 g/dl central) din interstițiu în sânge; acestea nu pot intra în sânge direct prin peretele capilarelor sanguine. La nivel intestinal, capilarele limfatice participă la absorbția nutrienților, mai ales a lipidelor. Aproximativ un sfert din proteinele plasmatică ajung în sânge pe cale limfatică. Circulația limfatică este un factor

important de control al lichidului interstițial în privința conținutului de proteine, volumului și presiunii. De fapt, rolul de drenaj al lichidului interstițial și cel de recuperare a proteinelor din interstițiu sunt interdependente; menținerea unei presiuni oncotoice reduse în interstițiu limitează excesul de fluid filtrat din capilarele sanguine ce ar trebui readus în circulație pe cale limfatică.

Prezența valvulelor la mică distanță de-a lungul întregului sistem limfatic obligă limfa să se deplaseze, într-un singur sens, spre locul de vărsare în circulația venoasă, ori de câte ori presiunea din spațiile interstițiale devine pozitivă (normal - 7 mmHg).

Volumul sanguin crescut după administrare de soluții izotone, cât și filtrarea capilară mărită de către substanțele vasodilatatoare de tipul histaminei (care dilată arteriolele și contractă venele) activează întoarcerea limfatică odată cu creșterea presiunii capilare. Prin aceasta, tendința la acumulare de proteine și apă în spațiile interstițiale este îndepărtată, iar starea de vacuum tisular este parțial restabilă.

Printr-un mecanism similar, de activare a circulației limfatice, mișcarea îndepărtează excesul de lichide interstițiale, realizând „uscarea” spațiilor intercelulare și presiunea ușor negativă necesară menținerii contactelor celulare.

În timp ce efortul și căldura cresc circulația limfatică, repausul o scade, predispunând la stază și edeme. Obstruarea vaselor limfatice de diferite cauze (corp străin, proces cicatricial, compresii etc.), împiedicând drenajul limfei și proteinelor din lichidul interstițial, produce un edem limfatic masiv, urmat de împănare și deformarea părților moi, denumit elefantiazis.

7.7. PARTICULARITĂȚI CIRCULATORII REGIONALE

Unele organe prezintă particularități circulatorii, în vederea asigurării funcțiilor specifice. Două dintre acestea sunt esențiale supraviețuirii de scurtă durată a organismului. Ele sunt reprezentate de circulația coronariană și cerebrală. Ambele sunt protejate atât de slaba participare a reacțiilor simpatico-adrenergice globale la situații de urgență, cât și de reflexele baroreceptoare de reglare și menținere a presiunii sanguine la ieșirea din ventriculul stâng, în limite cât mai strânse, pentru a realiza perfuzia normală a inimii și creierului. O a treia arie circulatorie poate fi vitală în cazul mușchilor scheletici, care fac posibilă lupta sau fuga.

7.7.1. CIRCULAȚIA CORONARIANĂ

Circulația coronariană asigură irigația și nutriția miocardului, cu rol primordial pentru activitatea contractilă a inimii. Aportul de sânge oxigenat și de substanțe nutritive la celulele miocardice, ca principală funcție a circulației coronariene, are la bază o serie de particularități morfo-funcționale.

Pe plan morfologic, cele două artere coronare, plecate din aortă imediat deasupra valvulelor sigmoide, se distribuie mușchiului cardiac în două planuri perpendiculare unul pe altul. Într-un plan de separare atrio-ventricular și cel de cloasonare interventriculară sunt numeroase anastomoze mai ales spre vârf. În timp ce artera coronară stângă irigă partea anterioară și laterală a ventriculului stâng, coronara dreaptă se ramifică atât în ventriculul drept, cât și în regiunea posterioară a ventriculului stâng în 80-90% din cazuri.

În aproape 50% din cazuri circulă mai mult sânge prin coronara dreaptă decât prin cea stângă, în 30% debitul este egal, iar în 20% predomină coronara stângă. La rândul său, sângele venos ajunge în proporție de peste 75% în sinusul coronar, provenind din ventriculul stâng și mai puțin din ventriculul drept. Restul sângelui venos se varsă în atriu drept, fie prin venele cardiace anterioare, fie prin venele tebesiene.

Pe plan funcțional, circulația coronariană se particularizează atât prin modificările fizice ale debitului sanguin coronarian, cât și prin caracterul limitat al modului de adaptare a cordului la hipoxie. Spre deosebire de celelalte teritorii vasculare, irigarea cordului se realizează în diastolă. Activitatea contractilă ritmică a miocardului ventricular jenează propria sa perfuzie, datorită compresiei vaselor coronare de către presiunile intraparietale și intracavitare, inerente fenomenului de contracție.

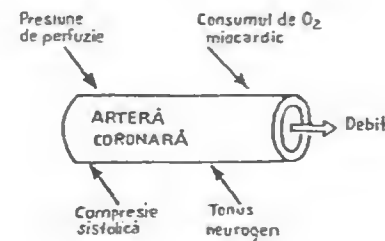


Fig. 7.64. Factorii determinanți ai debitului coronarian.

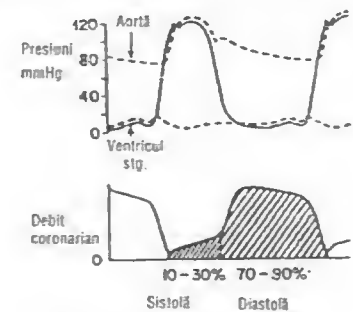


Fig. 7.65. Variațiile debitului coronarian în timpul ciclului cardiac.

Pe de altă parte, adaptarea la suprasolicități hipoxice se produce numai prin creșterea debitului sanguin local, fără variații ale extracției oxigenului din sânge sau comutări metabolice temporare anaerobe. Miocardul, extrăgând din sângele arterial peste 70% din oxigenul fixat pe hemoglobină (de 3-7 ori peste nivelul oricărui alt organ) și având metabolism aproape exclusiv aerob, adaptarea sa la necesități crescute se poate realiza numai prin creșterea debitului coronarian.

Debitul coronarian uman variază în condiții de repaus între 225 și 250 ml sânge/min, ceea ce corespunde la 0,7-0,8 ml sânge/g miocard sau 50% din debitul cardiac total. În efortul maximal, debitul coronarian poate crește de 4-5 ori, atingând valori de 1 000-1 250 ml/min.

Factorii determinanți ai debitului coronarian sunt: presiunea de perfuzie a coronarelor, compresia sistolică, consumul de oxigen miocardic, tonusul neurogen și substanțele vasoactive (fig. 7.64).

Presinnea de perfuzie a coronarelor depinde de presiunea sistolo-diastolică de la nivelul locului de emergență a aortei din inimă. Ea afectează profund fluxul sanguin coronarian atât în timpul sistolei, cât și al diastolei. În timpul sistolei ventriculare, debitul scade chiar din perioada contracției izovolumetrice, pentru a crește în diastolă odată cu încabiderea valvulelor aortice și relaxarea miocardului, ca urmare a reducerii rezistenței la flux a teritoriului vascular coronarian. Aproximativ 70-90% din debitul coronarian rezultă în timpul diastolei și doar 10-30% în perioada de ejeție sistolică (fig. 7.65).

În afara presiunii diastolice de perfuzie a miocardului (15-20 mmHg), debitul coronarian depinde, ca și în alte teritorii vasculare, de rezistența vaselor coronare. Aceasta constituie factorul determinant specific și cel mai important de autoreglare a debitului coronarian. Ea are la bază participarea diversilor factori extravasculari compresivi (compresia musculară sistolică, presiunea lichidului interstițial) și factori intravasculari (diametrul vaselor coronare, vâscozitatea sanguină, presiunea intracoronariană sistolo-diastolică, concentrația în O_2 etc.). Rezistența vasculară coronariană variabilă asigură adaptarea debitului coronarian și aportul de O_2 și substrat energetic la celulele miocardice. În general, debitul coronarian crește direct proporțional cu nevoia de oxigen a inimii, care este dependentă, la rândul său, de activitatea mecanică specifică. Fluxul coronarian pe gram de ventricul drept, de exemplu, reprezintă numai 2% din cel al ventriculului stâng, iar fluxul sanguin prin atriu drept, doar 1/2 din cel al atrului stâng.

Diferența arterio-venoasă a oxigenului din sângele care irigă miocardul fiind de 12-13 ml O_2 la 100 ml sânge trădează consumul crescut de peste 30 ml O_2 /minut, ceea ce corespunde la aproape 10% din consumul total al organismului. Datorită acestui fapt, sângele venos coronarian este cel mai desaturat sânge în oxigen din organism (4-5 ml O_2 /100 ml sânge), având o saturație doar de 25% față de 75-80% în alte teritorii.

Factorii determinanți ai consumului miocardic crescut de oxigen sunt: contractilitatea ritmică, tensiunea intraparietală sistolică, frecvența cardiacă, activitatea metabolică produsă de unii hormoni (catecolamine, hormoni tiroidieni) etc.

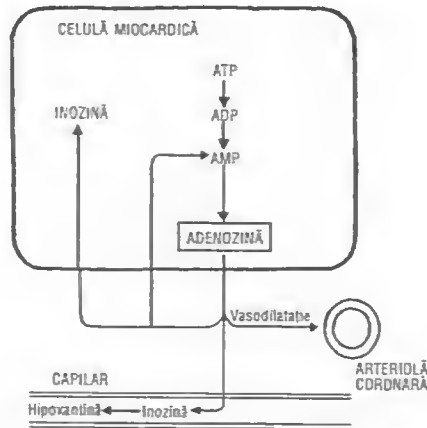


Fig. 7.66. Formarea și inactivarea adenozei în miocard.

În condiții bazale, consumul de O_2 al inimii este proporțional cu produsul dintre tensiunea miocardului ventricular și timpul de contracție. În caz de tahicardie, scurtarea timpului de umplere ventriculară diastolică reduce durata de perfuzie a ventriculului stâng, predisponând la tulburări de nutriție miocardică. În efort cresc atât debitul cardiac, cât și fluxul sanguin coronarian. Creșterea și adaptarea la necesitățile metabolice variabile ale debitului coronarian se realizează prompt, prin variațiile rezistenței coronariene intravasculare. Acestea dețin, de altfel, rolul principal în autoreglarea circulației coroariene.

Reglarea circulației coronariene se realizează pe cale nervoasă și umorală, cu participarea obligatorie a unor factori metabolici locali. Printre aceștia figurează în primul rând consumul de oxigen al miocardului, ca factor determinant major al debitului sanguin coronarian. Deficitul sau lipsa oxigenului dilată vasele coroare fie direct, fie prin intermediul unui mesager metabolic. Ilustrativ din acest punct de vedere este cazul hiperemiei reactive realizate după ocluzia coronarelor pentru o perioadă scurtă, de 5–30 s, a cărei intensitate este direct proporțională cu durata ocluziei.

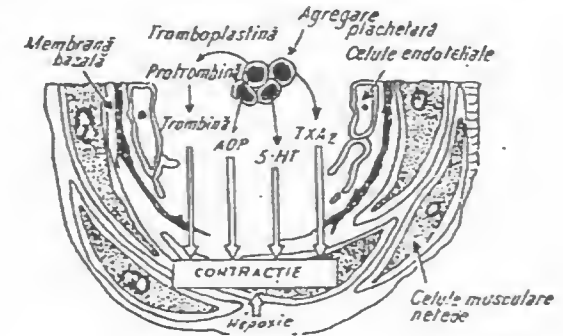
Substanțele coronarodilatatoare de tipul trinitrinei, nitriților și papaverinei realizează vasodilatație prin mecanismul anoxiei tranzitorii determinate de inhibarea consumului de oxigen și formarea de monoxid de azot (NO), relaxant al musculaturii netede vasculare.

Catecolaminele, tiroxina și căldura provoacă, de asemenea, coronarodilatație prin acțiunea directă vasculară.

Participarea unui mesager biochimic nu poate fi exclusă dacă se are în vedere că hipoxia produce deschiderea sfincterelor precapilare, la valori ale presiunii de perfuzie sub limita inferioară până la care acționează autoreglarea. Izolarea și identificarea mesagerului constituie o problemă nerezolvată a fiziologiei coronariene. Numeroase fapte experimentale pledează, după Berne, Rubio și colab. (1979), pentru participarea adenozei, ca principal mesager metabolic, la autoreglarea fluxului coronarian. Adenoza se formează în cantități crescute în condiții de hipoxie prin defosforilarea succesivă a ATP și ADP din miocite până la stadiul de AMP, care, în lipsa oxigenului, este degradat în adenozină și fosfor anorganic cu ajutorul 5'-nucleotidazei. Ajunsă în lumenul capilar, adenoza poate fi degradată de către enzimele endoteliale de tip adozin dezamioaze până la stadiul de inozină și hipoxantină, inactive, ori refosforilată către AMP sau antrenată de către fluxul capilar pentru a-și exercita efectul coronarodilatator prin intermediul unor receptori specifici (fig. 7.66).

Hipoxia, intensificând formarea de adozină, realizează arteriolo-dilatație coronariană proporțională cu cantitatea eliberată de creșterea fluxului coronarian și reducerea hipoxiei. Astfel, adenoza, participând la îndepărtarea cauzei care a generat-o, contribuie la autoreglarea circulației coronariene.

Fig. 7.67. Consecințe umorale și vasculare ale alterării endotelului coronarian (agregare plachetară și eliberarea de substanțe vasoconstrictoare) (după Shepherd și Vanhoutte, 1985).



În afara adenozei, hipoxia crește eliberarea de K^+ din celule. În timp ce hiperkaliemia crește fluxul coronarian, hipokaliemia îl reduce. Dintre ceilalți ioni, doar calciul pare implicat în tonusul coronarian, întrucât substanțele blocante ale canalelor de calciu de tipul nifedipinei, verapamilului și diltiazemului posedă proprietăți coronarodilatatoare.

Un rol tot mai important se atribuie, în ultimii ani, produșilor de metabolizare a acidului arahidonic endotelial în menținerea tonusului coronarian normal. Spre deosebire de endotelul vaselor coronare normale, care eliberează prostaciclina (PGI) ca precursor al factorului endotelial de relaxare (EDRF) identificat cu NO, endotelul alterat prin leziuni aterosclerotice sau fumat favorizează agregarea plachetară și eliberarea de substanțe coronarocconstrictoare de tipul tromboxanilor (TXA_2) și serotonininei (5-HT) (fig. 7.67).

Hipoxia locală, de diferite cauze, potențează contracția musculaturii netede și spasmul coronarian, produse de substanțele respective, în lipsa endotelului vascular eliberator de NO și prostaciclino anti-agregante și vasodilatatoare.

Autoreglarea metabolică intravasculară este întregită de controlul nervos vegetativ al fluxului sanguin coronarian. Acesta se realizează atât pe cale neuro-umorală directă, cu participarea noradrenergică și acetilcolinici ca mediatori chimici ai nervilor cardiaci simpatico-parasimpatici, cât și în mod indirect, prin efectele metabolice produse asupra circulației coronariene de activitatea crescută sau scăzută a inimii. Prin acțiune directă, stimularea simpatică determină constricția slabă a coronarelor mari de cauză alfa-adrenergică și dilatația moderată a arteriolelor de rezistență prin intermediul receptorilor beta₂-adrenergici. Noradrenalina eliberată de la nivelul terminațiilor simpaticale ale cordului, stimulând și receptorii beta₁-adrenergici din miocard, exercită efecte metabolice indirecte de tip coronarodilatator prin intensificarea consumului de oxigen produs de creșterea frecvenței și contractilității miocardice.

O inervație simpatică colinergică, similară cu cea din mușchii scheletici, nu a fost dovedită la nivelul vaselor coroare.

Sistemul parasimpatic, deși este bogat reprezentat în vasele coronare, provoacă o slabă coronarodilatație sau chiar vasoconstricție coronară prin intermediul receptorilor muscarinici inhibitori ai eliberării de noradrenalina coronarodilatatoare de la nivelul terminațiilor simpaticale perivasculare (fig. 7.68).

De subliniat, așadar, că efectele metabolice indirecte deși un rol mai important în reglarea neuro-umorală a circulației coronariene decât cele directe. Astfel, atât noradrenalina, cât, mai ales, adrenalina, acționând asupra ambelor tipuri de receptori adrenergici, induc coronarodilatație prin mecanism predominant metabolic. Dopamina, de asemenea, provoacă dilatarea coroarelor, indusă metabolic. Spre deosebire de catecolamine, a căror acțiune directă vasoconstrictoare este contracarată de efectele lor metabolice de tip coronarodilatator, atât vasopresina, cât și angiotensina din sângele circulant produc numai coronarocconstricție la doze mari nefiziologice.

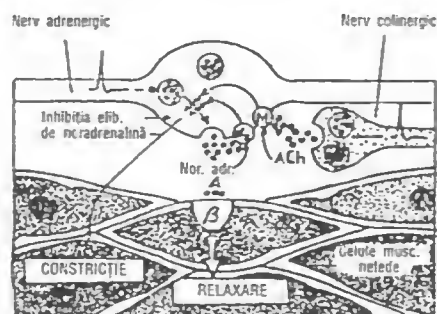


Fig. 7.68. Interacțiunea simpatico-parasimpatică la nivel coronar.

Dintre zonele reflexogene producătoare de reflexe coronariene fac parte zona sino-carotidiană și vasele cornoare. Regiunea sino-carotidiană este sediul unor reflexe chemo- și baroreceptoare declanșate de injectarea locală a diverselor substanțe excitante sau de variațiile de presiune sauguină. Experimental, s-a demonstrat că injectarea intracarotidiană de nicotină produce vasodilatație coronarioasă, iar ocluzia carotidelor induce coronaroconstricție contracarată de coronarodilatația indusă metabolic.

Pe de altă parte, ocluzia coronarelor provoacă pe cale reflexă vagală scăderea presiunii sanguine sistemice și bradicardie (reflexul Bezold-Jarisch). Acestea contribuie fie la producerea sincopei inaugurale în unele infarct de miocard, fie la instalarea șocului cardiogen postinfarct.

Spre deosebire de factorii metabolici care asigură menținerea constantă a fluxului și adaptarea lui la necesitățile nutritive variabile ale mușchiului cardiac, factorii nervoși tind să se opună autoreglării metabolice, determinând noi condiții de irigare normală sau patologică a miocardului.

7.7.2. CIRCULAȚIA CEREBRALĂ

Circulația cerebrală, deși are loc în spațiul închis al cutiei craniene inextensibile, este totuși dio ariile circulatorii locale bine reglate. Grație reacțiilor neuro-umorale compensatoare de autoreglare a circulației cerebrale, variații mari ale presiunii sanguine generale, între 60–180 mmHg, se soldează cu modificări mici ale presiunii și debitului circulator cerebral. În creier, venele îndeplinesc rol numai de conducte, nu și de rezervor sanguin, cantități egale de sânge ajung și pleacă dio teritoriul intracranian pentru a evita fenomenele de colaps sau compresiune cerebrală.

În timp ce circulația de întoarcere este favorizată de gravitație, expansiunea sistolică a arterelor și aspirația toracică, circulația arterială apare îngreuiată de cudură carotidelor și poligonului Willis, care amortizează o parte din forța de expulzie a sângelui. În plus, datorită ortostatismului, presiunea efectivă de perfuzie a creierului este cu aproximativ 20–25 mmHg mai mică decât cea dio aortă.

Debitul sanguin cerebral mediu variază între 55 și 60 ml/100 g/min, ceea ce înseamnă cam 750–800 ml/mio, în cazul creierului uman de 1 300–1 350 g. În comparație cu masa encefalică, de 2% din greutatea corporală, fluxul sanguin cerebral reprezintă 15% din debitul cardiac total. Viteza de scurgere este, de asemenea, mare, realizând traversarea creierului de către izotopi în 3 s. În timpul efortului fizic, defecăției, travaliului și al expirului forțat cu glota închisă, în general, circulația de întoarcere cerebrală devine mai anevoioasă, jugularele se umflă, fața se congestionează, datorită presiunii intratoracice pozitive.

Creierul, fiind cel mai mare consumator de oxigen, prezintă o sensibilitate deosebită la anemie. Dacă bulbul este mai rezistent (20–30 min), scoarța apare foarte vulnerabilă (2–3 min).

Consumul de oxigen/minut este de 3 ml/100 g, respectiv 40–50 ml pentru creierul total, corespunzând la 18% dio oxigenul consumat de întregul organism. La rândul său, consumul de glucoză al creierului atinge 4–5 g/oră, ceea ce reprezintă cam 100 g/24 de ore. Pentru a satisface aceste necesități metabolice mari ale creierului, debitul sanguin cerebral se adaptează la condițiile variabile locale pe cale predominant umorală, cu participarea gazelor din sânge.

Autoreglarea circulației cerebrale se realizează pe cale predominant metabolică. Ea depinde în primul rând de concentrația oxigenului și bioxidului de carbon din sângele care irigă țesutul nervos cortico-subcortical. Excesul de CO_2 , ca și deficitul de O_2 , cauzează vasodilatație. Dublarea concentrației CO_2 , de exemplu, determină și dublarea debitului, în vederea îndepărtării sale ca factor de vasodilatație

și de reducere a excitabilității neuronale. Invers, scăderea CO_2 reduce fluxul sanguin cerebral pentru a permite acesuia (CO_2) să revină, prin acumulare, la valori normale. Asemănător deficitului de CO_2 , excesul de O_2 crește tonusul muscularii netede vasculare, predispunând la vasoconstricție și la reducerea fluxului sanguin cerebral.

La rândul său, scăderea cu 75% a saturației în O_2 a sângelui arterial crește debitul sanguin cerebral cu 40%, dovedind astfel acțiunea sa vasculară ceva mai slabă decât a CO_2 . De fapt, efectele circulatorii ale celor două gaze sanguine se sumează, completându-se. Ca factor principal al autoreglării circulației cerebrale, CO_2 , rezultat din reacțiile oxido-reductoare locale, deține rolul de bază în vasomotricitatea și adaptarea circulației cerebrale la necesități. În timp ce creșterea coconcentrației CO_2 din sânge provoacă o evidentă vasodilatație locală, valorile scăzute din timpul hiperpneei induc modificări vasculare de sens invers.

Experimental, s-a demonstrat, de altfel, că zonele din creier în stare de hipoactivitate prezintă fenomenul de vasodilatație și hiperemie adaptativă, determinat de acumularea de cataboliți (CO_2 și H^+), pe de o parte, și de către anoxemie, pe de alta. În sens vasoconstrictor nu apar reacții evidente, ci doar creșteri ale tonusului vascular cerebral prin același mecanism umoral asigurat de coținutul scăzut în substanțe vasodilatatoare.

La rândul lor, adrenalina și noradrenalina produc, ca și excitarea simpaticului cervical, efecte constrictoare slabe, doar la nivelul vaselor piale.

Reglarea extrinsecă, extracerebrală, intervine numai când prăbușirea presiunii sanguine este de peste 50% din valoarea normală. Paralel cu răspunsurile neuro-reflexe compensatoare generale, apar în asemenea împrejurări fenomene tranzitorii de vasoconstricție regională, realizată pe calea inervației simpatice perivasculară. Vasele cerebrale sunt bogat inervate de simpaticul cervical. Nici secționarea și nici stimularea acestuia nu produc însă modificări vasculare intracraniene importante, din cauza contracării lor de către mecanismele autoreglării metabolice. Când presiunea sanguină periferică crește în efort, se produce no oarecare grad de vasospasm cerebral cu rol protector. Creșterile presiunii intracraniene sunt contracarate într-un prim moment prin vasoconstricție, urmată de vasodilatație intrinsecă de origine locală, pentru ca, ulterior, să se soldeze cu reacții reflexe presoare generale, care vor asigura irigarea satisfăcătoare a creierului. Prin astfel de reacții, debitul sanguin cerebral este menținut în limite normale chiar dacă presiunea sauguină sistemică prezintă variații mari, între 60 și 160 mmHg. La persoanele hipertensive, autoreglarea funcționează până la 180 sau chiar 200 mmHg. Ineficiența ei duce la creșterea presiunii capilare și la edem cerebral sau la hemoragii cerebrale.

7.7.3. CIRCULAȚIA MUSCULATURII SCHELETICE

Musculatura scheletică, reprezentând la om aproximativ 40–50% din greutatea corporală, deține un rol important în repartiția sângelui circulant, atât în condiții de repaus, cât, mai ales, în stare de activitate. În condiții de repaus, consumul de oxigen al mușchilor striati fiind doar de 50–60 ml/min, debitul sanginic total al acestora nu depășește 800–1 000 ml/mio. În timpul efortului fizic, consumul de oxigen și fluxul sanguin muscular cresc proporțional cu întesitatea acestuia, atingând valori de 15–25 de ori superioare celor din repaus, pe seama creșterii corespunzătoare a debitului cardiac, a dilatării vaselor din mușchi și a redistribuirii sângelui în diferitele arii corporale. Determinând fenomene de predominanță simpatică, efortul fizic realizează creșterea debitului cardiac și a presiunii arteriale, precum și deschiderea capilarelor din mușchii în stare de activitate.

Arteriolele musculaturii scheletice sunt bogate în inervație simpatică și receptori beta-adrenergici dilatatori. Adrenalina de origine suprarenală este vasodilatatoare, în timp ce noradrenalina eliberată local este vasoconstrictoare. În plus, vasele mușchilor striati posedă fibre simpatice colinergice, al căror mediator chimic este acetilcolina, prevăzută cu efecte puternic dilatatoare.

La vasomotricitatea neurogenă se adaugă participarea unor factori locali mecanici. În cursul efortului ritmic, contracția musculară maximală se însoțește de reducerea fluxului sanguin local, iar, în timpul relaxării, fluxul crește. Circulația în mușchii fizici este mai puternic afectată de contracțiile ritmice decât

în cazul mușchilor tonici. În timp ce aportul de sânge este împiedicat de fenomenul de contracție, ca și în cazul circulației coronariene, întoarcerea venoasă este facilitată.

În afara factorilor extrinseci neurogeni și mecanici, circulația mușchilor scheletici este sub controlul factorilor metabolici locali. Aceștia dețin de fapt rolul principal în producerea dilatației vaselor rezistive precapilare din mușchii activi, permițând creșterea debitului sanguin, corespunzător nevoilor metabolice locale. În acest sens pledează faptul că vasodilatația persistă după denervare. Creșterea fluxului sanguin la nivelul musculaturii în stare de activitate se datorește acțiunii dilatatoare însumate a mai multor factori metabolici rezultați din metabolismul intrinsec muscular. Printre aceștia figurează consumul crescut de oxigen, excesul de acid lactic, CO_2 , radicali liberi și ioni de potasiu din sânge precum și de adenozină rezultată din consumul crescut de ATP. Deși rolul fiecăruia din acești factori nu este suficient cunoscut, sigur apare faptul că hipoxia locală, creșterea osmolarității și concentrației potasiului în sângele muscular contribuie la producerea vasodilatației și debitului sanguin crescut din musculatura activă.

În afara acțiunii vasculare directe, factorii biperemianți produc și o simpaticoliză locală, întrucât anulează vasoconstricția indusă de stimularea nervoasă simpatică. Componenta reglatoare neurogenă participă mai mult la mobilizarea și deplasarea masei sanguine generale spre musculatura în stare de activitate, decât la asigurarea autoreglării locale. Aceasta se găsește sub controlul adaptativ al factorilor metabolici și mecanici locali, modulați în permanență de factorii neurogeni și hormonal generali.

Particularitățile circulației pulmonare și renale vor fi menționate la capitolele respective.

8. FIZIOLOGIA APARATULUI RESPIRATOR

Ca funcție vitală a organismelor vii, respirația reprezintă ansamblul fenomenelor fizice, chimice și biologice prin care se asigură schimbul de gaze între organism și mediu, necesare proceselor de oxidare tisulară. Consumul de O_2 și eliminarea de CO_2 reprezintă o funcție comună tuturor ființelor vii. Cu mici excepții, viața este posibilă numai în prezența, în principal, a O_2 , sub o formă absorbabilă. Accesul său către beneficiar – celula – se face diferențiat, în funcție de poziția pe scara evoluției filogenetice, de la simpla difuziune membranară, în cazul animalelor inferioare, la transportul și schimbul gazos realizat cu ajutorul unor structuri diferențiate, la animalele superioare.

La mamifere și om, actul complex al respirației se realizează în trei etape – pulmonară, sanguină, tisulară, cu participarea căilor aeriene și plămânilor, pe de o parte, și a pompei cardiace, pe de altă. Ramificațiile celor două sisteme de pompare se apropie la nivelul parenchimului pulmonar, aerul și sângele fiind separate doar de membrana alveolo-capilară (fig. 8.1).

La realizarea transportului gazelor respiratorii în organism participă două categorii de procese fizice, convective și de difuziune. Procesele convective asigură deplasarea moleculelor de gaz la distanțe relativ mari, pe cale aeriană-ventilatorie și apoi sanguină, în vederea primenirii lor continue la nivel pulmonar și tisular.

La rândul lor, procesele de difuziune asigură transferul în teritoriul limitat pulmonar și tisular al O_2 și CO_2 , înăuntrul și în afara sistemului circulator închis.

La nivel celular, oxigenul este utilizat în complexe procese oxidative furnizoare de energie, care au ca rezultat formarea unor „deșeurii” biologice, a căror eliminare sau neutralizare este, de asemenea, esențială pentru menținerea vieții.

În ansamblu, schimbul gazoasă la mamifere și om necesită:

- captare de O_2 și eliminare de CO_2 , realizate la nivel pulmonar și cunoscute sub denumirea de respirație pulmonară (respirație externă);
- transport de gaze respiratorii de către sânge (etapă sanguină);
- participarea O_2 la reacțiile oxidoreductoare celulare, producătoare de energie și CO_2 (respirație celulară, sau internă).

În timp ce respirația pulmonară asigură schimbul de gaze dintre organism și mediul înconjurător la nivel pulmonar, funcția respiratorie a sângelui realizează transportul în dublu sens al acestora pe cale sanguină, în vederea utilizării oxigenului la nivel celular și îndepărtării CO_2 rezultat din combustii tisulare.

8.1. RESPIRAȚIA PULMONARĂ

Respirația pulmonară, sau externă, ca primă etapă a respirației se realizează în două faze: una mecanică, ventilatorie, și alta fizico-chimică, reprezentată de schimbul gazoasă alveolo-capilar.

Componenta mecanică realizează înnoștrirea aerului de la nivelul suprafeței alveolare de schimb, ca urmare a diferențelor de presiune dintre aerul atmosferic și cel pulmonar, create de distensia și retracția ritmică a cuștii toracice. Variațiile presiunii intratoracice, fiind însoțite de modificări presionale similare la nivelul căilor respiratorii pulmonare, determină intrarea sau ieșirea aerului din plămâni, după cum țesutul

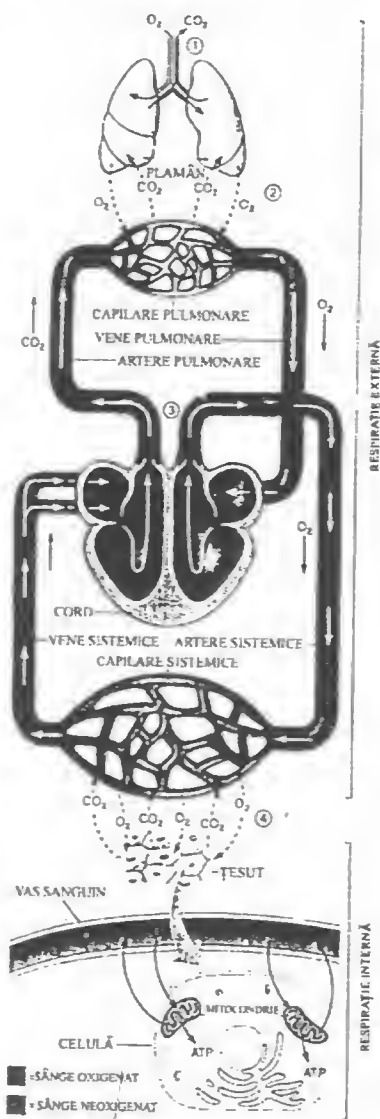


Fig. 8.1. Etapele respirației - relațiile dintre respirația externă și cea internă.

fibro-elastic pulmonar s-a dilatat sau s-a retractat în timpul unui ciclu respirator reprezentat de inspir și expir.

Compoziția mecanică, ventilatorie, este întregită de schimbul de gaze între aerul alveolar și sângele venos capilar dependent de integritatea membranelor alveolo-capilare și eficiența legilor fizice ale difuziunii celor două gaze respiratorii.

La baza acestor procese complexe stau particularități morfo-funcționale ale căilor respiratorii și sistemului toraco-pulmonar, ce vor fi succint prezentate, înaintea datelor propriuzise de fiziologie a respirației pulmonare.

8.2. PARTICULARITĂȚI MORFO-FUNCȚIONALE ALE APARATULUI RESPIRATOR

Ca orgao fibro-elastic dilatabil în cavitatea toracică variabilă în inspir și în expir, plămânul se comportă ca un veritabil container elastic pasiv, capabil să-și modifice volumul sub influența creșterii sau reducerii diametrelor sale în timpul respirației. Predominanța țesutului elastic face ca, sub influența presiunii negative intrapleurale, parenchimul pulmonar să urmeze cu fidelitate mișcările cuștii toracice, determinând modificări ale volumului și presiunilor intrapulmonare, însoțite de deplasarea în sens dublu a aerului atmosferic în căile respiratorii. Respirația este asigurată prin activitatea perfect coordonată de deplasare a aerului prin sistemul ramificat de tuburi aeriene cu sistemul hemodinamic de mișcare a sângelui spre capilarele pulmonare. Ramificațiile celor două sisteme converg, astfel încât la nivelul membranei alveolo-capilare cele două fluide în mișcare sunt aproape în contact, grosimea stratului separator fiind minimă și perfect adaptată funcției de schimb.

Practic, sistemul respirator are doi poli:

- polul pulmonar, unde are loc respirația externă (vehiculare de aer prin sistemul de conducte + schimburile gazoase aer-sânge);
- polul tisular, unde au loc, pe de o parte, schimbul de gaze respiratorii sânge-țesut, prin intermediul lichidului interstițial, iar, pe de altă parte, respirația internă celulară (utilizarea O_2 și generarea CO_2 de către celule).

La nivelul polului pulmonar se disting:

- a) o zonă de conducere, care este nealveolizată (nu conține alveole), deci nu participă la schimburile gazoase. În acest sector are loc un transfer de masă convectiv, în care regimul de curgere este proporțional cu diametrul conductei la puterea a 4-a;

- b) o zonă respiratorie - alveolizată -, care este sediul hematozilor pulmonare. Această zonă corespunde acinilor

pulmonari care cuprind trei generații de bronhiole respiratorii parțial alveolizate (generațiile 17-19), canale alveolare și saci alveolari complet alveolizați (generațiile 20-23). Transferul se face prin difuziune (fig. 8.2).

De aceeași maoieră se pot împărți și vasele:

- vasele zonei de conducere (vase extraalveolare), cu un sistem de curgere rapidă (artere, arteriole, venule, vene);
- vasele zonei alveolare (precapilare, capilare), cu viteză de circulație foarte lentă, favorizând schimburile gazoase.

Plămânul este sediul procesului de ventilație pulmonară. Funcția sa se realizează, pe de o parte, datorită legăturilor morfo-funcționale cu toracele, justificând noțiunea de sistem toraco-pulmonar folosită în mecanica respiratorie, iar, pe de altă parte, prin sistemul de conducte care coostituie arborele bronșic și servește transportului de gaze.

Plămânul conține și sediul sectorului de schimb respirator, reprezentat de bariera alveolo-capilară.

Greutatea acestui organ variază între 0,8-1 kg, din care aproape jumătate este asigurată de sânge, 20% din masa pulmonară este reprezentată de țesut nealveolizat, irigat prin arterele bronșice, iar 30% de țesut alveolizat irigat prin arterele pulmonare.

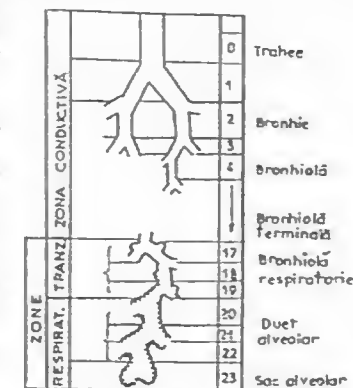


Fig. 8.2. Căile aeriene după Weibel (1963).

8.2.1. SISTEMUL DE CONDUCTE AERIENE

Sistemul de conducte aeriene reprezentat de nazo-faringe, laringe, trahee, bronhii și bronhiole prezintă o zonă de conducție (superioară) și o zonă respiratorie propriu-zisă (inferioară).

Caracteristic căilor respiratorii superioare este prezența scheletului cartilajinos, țesutului musculo-elastic, plexului vascular submucos și epitelului ciliat.

La nivelul căilor respiratorii inferioare, absența cartilajelor din teritoriul bronșiolar este supleată de prezența surfactantului pulmonar secretat atât de celulele Clara bronșiolare, cât și de pneumocitele de ordinul II alveolare. Reducând tensiunea superficială de la nivelul suprafeței alveolare, aceasta meoțioe canalele alveolare deschise, permițând deplasarea aerului până la nivelul teritoriului de schimb gazos alveolo-capilar.

Grație particularităților sale morfo-funcționale, sistemul de conducte aeriene asigură:

- deplasarea aerului în dublu sens, cu posibilitatea de reglare a debitului, rezistenței la flux și a volumului spațiului mort;
- încălzirea și umectarea aerului;
- captarea și îndepărtarea particulelor inhalate (proces de apărare nespecifică).

Traheea și bronhiile principale (canale indepedeote de țesutul pulmonar respirator) au o armătură cartilajinoasă dispusă în potcoavă, închisă posterior printr-o porțiune musculară. Țesutul conjunctiv cartilajinos le conferă o oarecare rigiditate, care le permite să rămână permeabile în cazul presiunii crescute intratoracice, din expirul forțat, iar componenta musculară, prin colabarea adecvată, determină creșterea vitezei de mișcare a aerului, favorizând eliminarea sa și expectorația, în tuse.

Pentru următoarele 2-3 generații de ramificații, cartilajul este neregulat, stratul muscular este mai bine reprezentat, iar glandele bronșice, care vor deveni mult mai rare în bronhiile mici, acum sunt numeroase.

Dispoziția oblică și circulară a fibrelor musculare și sensibilitatea la diferiți factori endo- și exogeni oferă posibilitatea unor variații de calibr, cu atât mai importante, cu cât țesutul cartilajinos este mai redus.

Bronhiiolele cu diametrul sub 1 mm nu au inel cartilajinos, nu au glande bronșice și sunt tapetate cu un epiteliu cubic simplu.

Bronhiile intrapulmonare sunt înconjurate de un corset conjunctiv pușio extensibil, care le separă de pareochim și delimitează un spațiu virtual comun bronhiilor și arterelor pulmonare.

Acest suport conjunctiv dispăre la nivelul bronhiolilor și parenchimul se inseră direct pe perețele lor extern, cu coesecioe funcționale importante.

Între bronhiile și parenchim se stabilește o interacțiune în ambele sensuri, astfel încât variațiile volumului pulmonar sunt transmise direct bronhiolilor mici, iar contracția musculaturii acestora atrage radier parenchimul, modificându-i complianța.

8.2.2. STRUCTURA FUNCȚIONALĂ A PLĂMÂNULUI

Plămânul, în ansamblu, conține mai mult de 30 de varietăți de celule, o proporție însemnată revenind unicilor mucoase.

Mucoasa are particularități structurale și funcționale în funcție de sectorul pe care îl tapetează.

La nivelul traheei și bronhiilor mari, epiteliul este pseudostratificat cilindric ciliat, format din mai multe tipuri de celule:

- celule ciliate, prezentând fiecare circa 250 de cili la polul apical;
- celule caliciforme (în proporție de 1 la 5 celule ciliate), secretoare de mucus. Numărul lor crește în cazul unor agresiuni toxice sau virale;
- celule cu marginea „în perie”, bogate în ribozomi liberi, implicate în resorbția unei cantități de mucus și în unele procese secretorii;
- celule bazale cu rol în regenerare;
- celule neuro-ectodermice, cu conținut bogat în granule secretoare de hormoni locali de tip aminic (histamină, serotonină, catecolamine), polipeptidic (VIP, TSH, MSH, ACTH, calcitonină, gastrină, secretină, kinine plasmatice, vasopresină etc.) și lipidic (prostaglandine, tromboxani, prostaciline, leucotriene). Nu s-au evidențiat legături ale acestor celule cu fibre nervoase aferente sau eferente. Posedând capacitatea de a capta precursori de biamine, ele aparțin sistemului endocrin difuz (APUD).

La suprafața epiteliului se deschid canalele glandelor mucoase care se extind în profunzime până în stratul muscular.

Corionul, situat imediat subepitelial, conține numeroase limfocite, mastocite, eozinofile, o rețea fibro-elastică cu dispoziție longitudinală și capilare de 2-3 ori mai numeroase, comparativ cu rețeaua alveolară.

În submucoasă se găsesc glande bronșice de tip sero-mucos, de 1 mm lungime, ale căror canale de excreție pot ajunge până în stratul muscular. Aceste canale au o dispoziție circulară în bronhii și spiralată în bronhiole și pot produce, prin contracția lor, plisarea mucoasei și închiderea lumenului.

Bronhiolile respiratorii și canalele alveolare constituie un teritoriu de tranziție spre alveole. Epiteliul este de tip cubic, iar între celulele epiteliale apar intercalate capilarele subepiteliale.

Când diametrul bronhiolilor scade sub 1 mm, dispar cartilajul, glandele sero-mucoase și oodulii limfatici, iar epiteliul devine cubic, cu sau fără cili. Celulele caliciforme scad numeric și dispar spre porțiunile distale. Devin mai abundențe celulele neciliate, proeminente în lumen, denumite celule Clara.

Celulele Clara au aparat Golgi și reticul endoplasmatic bine reprezentat și conțin numeroase granulații exocric dense. Ele sunt implicate în elaborarea mucusului și surfactantului pulmonar.

Unitatea funcțională a plămânului este acinul pulmonar, sau unitul respirator, format din structurile ce încep la nivelul bronhiolilor respiratorii. La acest nivel, epiteliul cubic devine turrit și lipsit de cili. Alveolele pulmonare au pereți subțiri, construiți dintr-o rețea de capilare sanguine anastomozate, înglobate într-o rețea de reticulină și un înveliș epitelial format din două tipuri de celule:

- pneumocite de tip I (membranoase), celule mici, pavimentoase, în număr redus;
- pneumocite de tip II (granulare), celule mari, rotunde sau cuboidale, mult mai numeroase, bogate în corpi deosebiți secretari de surfactant pulmonar antiatelectazic. În pereții alveolari se găsesc și celule macrofage aparținând fagocitelor mononucleate.

Alveolele alăturate comunică prin mici orificii numite pori alveolari.

Numărul alveolelor pulmonare a fost evaluat la aproximativ 300 milioane, realizând o suprafață de schimb gazos de 80-100 m².

Lobulii și acinii au o rețea de fibre elastice și colagene în strânsă legătură cu structurile bronhiolilor și arteriale, care constituie un conținut elastic, astfel încât fiecare cale aeriferă și fiecare vas sunt legate elastic de structurile vecine. Consecința funcțională a acestui tip de relații structurale este posibilitatea de transmitere a tensiunilor ce iau naștere într-un punct al sistemului elastic pulmonar, prin rețea, tuturor părților componente ale sistemului.

Structura cea mai puternic implicată în funcția respiratorie a plămânului este *membrana alveolo-capilară*, adaptată perfect funcției de schimb gazos prin procese fizico-chimice de simplă difuziune.

Ea constituie o adevărată barieră aer-sânge, formată din membrană bazală alveolară, surfactant pulmonar, pneumocite I și II, pe de o parte, și membrană bazală capilară și endoteliu capilar, pe de altă parte, separate doar de spațiul septal (interstițial). Grosimea membranei alveolo-capilare normale nu depășește 0,4-0,6 μm, permițând transferul rapid al celor două gaze prin simpla diferență de presiune parțială a acestora în teritoriul alveolar și capilar al barierei aer-sânge.

La exterior, plămânii sunt tapetați de foia viscerală a seroasei pleurale, care împreună cu cea parietală formează spațiul pleural lubrifiat, cu presiune negativă, indispensabil proceselor de ventilație pulmonară (vezi Mecanica respiratorie).

8.2.3. VASCULARIZAȚIA PLĂMÂNULUI

Plămânul este un organ de vascularizație dublă, nutritivă, asigurată de vasele bronșice aparținând circulației sistemice cu regim de presiune înaltă, și funcțională, realizată de circulația pulmonară sau mica circulație, cu regim de presiune joasă.

Deși aparțin unor compartimente diferite, cele două circuite sanguine stabilesc între ele comunicări prin anastomoze de diferite tipuri.

8.2.3.1. Vascularizația nutritivă

Vasele bronșice asigură vascularizația bronhiilor și a vaselor mari pulmonare, a septurilor fibroase, a pleurei viscerele și parietale mediastinale.

Ramurile arteriale sunt satelite bronhiilor și merg până la bronhiolile terminale, dar nu ajung până la zona alveolizată.

Rețeaua capilară care se formează din arteriolele bronșice se continuă cu două plexuri venoase - submucos și peribronșic. Cele două plexuri realizează, prin comunicările dintre ele, numeroase anastomoze veno-venoase.

Drenajul venos al plexului peribronșic se face spre vena azigos în partea dreaptă și în hemiazigos și intercostală superioară pentru partea stângă.

Plexul submucos efectuează drenajul în cea mai mare parte în venele pulmonare, explicând infiltrația cu sânge venos a sângelui care ajunge în atrul stâng. Cantitatea de sânge venos care pătrunde în atrul stâng este de numai 1-2% din debitul cardiac, datorită faptului că debitul sanguin pulmonar este mult mai mare față de cel bronșic.

În unele circumstanțe patologice, când circulația pulmonară este obstruată sau distrusă, între cele două sisteme circulatorii se dezvoltă numeroase anastomoze anormale, astfel încât circulația bronșică preia o parte din rețeaua arterială pulmonară. În aceste condiții, debitul arterial bronșic poate crește, atingând valori până la 5-20% din debitul ventriculului stâng. Circulația pulmonară neadaptată valorilor tensionale crescute din teritoriul bronșic poate fi sediul unor hemoragii grave.

8.2.3.2. Vascularizația funcțională

Circulația pulmonară, sau mica circulație, este formată dintr-un sistem arterial pulmonar, care cuprinde artera pulmonară și ramurile sale divizionare până la capilarele pulmonare, și un sistem venos pulmonar, care constituie circulația de retur spre inima stângă.

Vasele circulației pulmonare au o serie de particularități morfologice justificate de funcția lor. Vasele arteriale pulmonare se împart în: artere elastice (diametru mai mare de 1 mm), artere musculare (diametru între 100 μ m și 1 mm) și arteriole (diametru cuprins între 10–100 μ m), ce se continuă cu vasele precapilare, al căror diametru este cuprins între 20–40 μ m.

Arterele elastice se întind pe o distanță de aproximativ 20 cm, ceea ce reprezintă 90% din distanța care separă valvulele pulmonare de patul capilar. Regimul presional din sectorul circulației pulmonare este de aproape 6 ori mai scăzut comparativ cu cel din circulația sistemică. La calibru egal, vasele circulației pulmonare au pereții de două ori mai subțiri și mai distensibili (fig. 8.3).

Spre deosebire de structura peretelui aortei, care are media formată din lamele de fibre elastice dispuse circular, concentric, realizând o structură ordonată, în peretele arterelor pulmonare fibrele sunt scurte, discontinue, dând un aspect de masă amorfă. Fibrele musculare care se găsesc la acest nivel se inseră în spirală pe fibrele elastice. Numărul lor este foarte redus. Astfel, în artera pulmonară și ramurile ei principale numărul lor este de 20–30, în timp ce arterele cu calibru de 1 mm sunt în jur de 3–4. Rolul lor nu este atât în vasomotricitate, cât în mularea pe conținutul sanguin.

Alături de fibrele elastice și musculare se găsesc collagen și substanță fundamentală bogată în heteropolizaharide acide de tipul condroitinei. Volumul de sânge care se găsește în circulația pulmonară variază în funcție de sectorul vascular. Astfel, arterele elastice cuprind aproximativ 120 ml de sânge (80% din volumul total al circulației pulmonare).

Distensibilitatea arterelor pulmonare și a celor două ramuri principale este foarte mare și permite ca, în timpul sistolei, peste volumul de 50 ml pe care-l conțin în diastolă să se adauge jumătate din debitul sistolic fără ca presiunea să depășească 12–15 mmHg. Suprafața de secțiune totală variază între 3–25 cm².

Arterele musculare au un perete subțire, care reprezintă, în stare de relaxare, aproximativ 3–6% din valoarea diametrului extern.

În timpul contracției, diametrul extern se reduce cu aproape 20%, iar suprafața lumenului, micșorându-se cu 65%, conduce la o creștere de aproape 8 ori a rezistenței la scurgere (fig. 8.4).

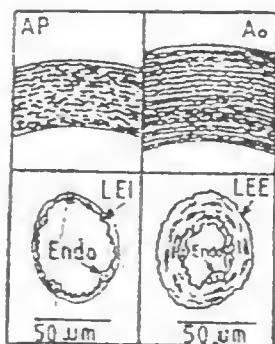


Fig. 8.3. Secțiune transversală prin artera pulmonară (AP) și aortă (Ao). Endo, endoteliu. LEI, limitantă elastică internă. LEE, limitantă elastică externă.

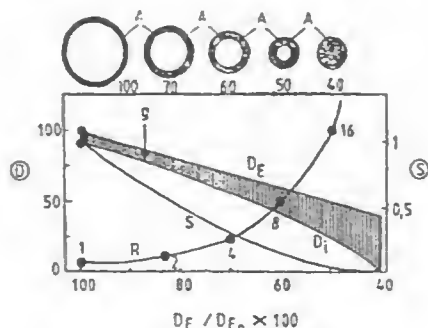


Fig. 8.4. Secțiune la nivelul vaselor arteriale pulmonare de tip muscular. Variații ale diametrului intern (D_i), diametrului extern (D_e), ale grosimii peretelui (g), ale secțiunii lumenului (S) și ale rezistenței (R) în timpul contracției (suprafața A rămâne constantă) (după Meyer, 1980).

Reducerea, în cazuri extreme, a diametrului extern cu 50% este urmată de închiderea lumenului vascular.

Arteriolele pulmonare se întind pe o distanță de numai 2 mm, deci 1% din distanța care separă valvulele pulmonare de patul capilar. Suprafața lor totală de secțiune este de 25–40 cm² și volumul de sânge pe care îl conțin este foarte redus, de numai 3 ml.

Vasele precapilare (aproximativ 300 milioane) cu care acestea se continuă, fără a fi limitate de sfinctere precapilare bine reprezentate, ca în circulația sistemică, cuprind 5 ml sânge.

Viteza de circulație este mică, scăzând de la 2 la 0,2 cm/s și ajungând la valori de aproape 20 de ori mai reduse în sectorul capilar, favorizând astfel schimburile gazoase.

Sectorul arteriolelor pulmonare de tip muscular este un sistem de rezistență mare și capacitate scăzută, caracterizat printr-un volum scăzut de sânge, suprafață de secțiune mare, cu numeroase bifurcații. Această zonă este sediul rezistențelor la curgere și al controlului vasomotricității pulmonare.

Capilarele pulmonare formează o rețea densă și regimul lor funcțional nu este condiționat și controlat de prezența unor sfinctere ca acelea care se găsesc în circulația sistemică.

Volumul de sânge care se găsește în acest sector a fost estimat în medie la 150 ml (cu variații între 75–200 ml, în repaus și în timpul efortului muscular).

Organizarea patului capilar pulmonar poate fi exprimată fie sub forma unei rețele de ochiuri hexagonale, fie sub forma unei pelicule de sânge aproape continue, limitată prin două membrane fine de fiecare versant alveolar. Aceste membrane prezintă pilieri verticali, dispuși ordonat, care sunt constituiți prin zonele interstițiale intercapilare ale membranei alveolo-capilare. Acest model de dispoziție, în peliculă, are avantajul de a arăta că distensibilitatea peretelui capilar este mai redusă în planul septurilor, unde expansiunea vasului este limitată de spațiul interstițial dens care constituie pilierii, și este mare în planul perpendicular pe septuri, unde capilarele sunt limitate numai de membrana bazală, endoteliu și epiteliu. Ca urmare, suprafața capilară depinde, în planul care o desparte de alveolă, de gradul de inflație a plămânului, iar, în axul perpendicular pe membrana alveolo-capilară, de presiunea transmurală.

Presiunile în circulația pulmonară. Vasele pulmonare funcționează la un nivel de joasă presiune, condiționată de presiunea mică pe care o dezvoltă ventriculul drept în timpul sistolei, de complianța mare a sistemului vascular pulmonar și de rezistența mică pe care o opune acesta la curgerea sângelui. La fiecare sistolă, presiunea în artera pulmonară și ramurile ei principale atinge rapid valoarea de 20–25 mmHg. Urmează apoi (fig. 8.5) o scădere până la nivelul incizurii dicrote (d), care se datorește închiderii valvulelor sigmoide, și o descreștere de tip exponențial până la valoarea minimă telediastolică de 8–10 mmHg.

Presiunea medie (P_{ap}) variază între 10–17 mmHg și crește progresiv, odată cu vârsta.

Porțiunea sistolică a curbei, înaintea incizurii, este determinată de accelerația sângelui și distensia pereților. Este mai abruptă dacă volumul sistolic, viteza de evacuare a sângelui și rigiditatea pereților sunt mai mari și devine mai lină în condițiile unei complianțe crescute și ale unei rezistențe periferice mici.

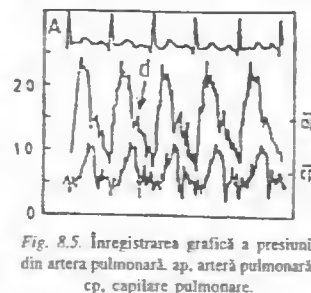
Porțiunea descendentă, diastolică, depinde de elasticitatea pereților arteriali și de rezistența periferică la curgerea sângelui.

Presiunea din venele pulmonare este de aproximativ 4–5 mmHg, apropiată ca valoare cu cea înregistrată în atrul stâng. Venele pulmonare sunt inextensibile și pot fi foarte ușor colabate; rolul lor fiziologic constă în reglarea presiunii sângelui care se deplasează din patul capilar pulmonar spre atrul stâng.

Volumul sanguin pulmonar. Se determină cu ajutorul diluției unor indicatori vasculari injectați alternativ în trunchiul arterei pulmonare și la nivelul urechiușei stângi, urmată de cuantificarea indicatorilor în una din arterele sistemice (fig. 8.6).

Volumul sanguin arterial pulmonar este de 120–150 ml la sfârșitul diastolei și 170–200 ml în sistolă.

Volumul spațiului capilar, obținut prin metode morfometrice, este de aproximativ 170 ml (90–240 ml). Variații fiziologice apar în starea de repaus (80 ml) față de condițiile de efort (160 ml) și, de asemenea, în clinostatism față de ortostatism.



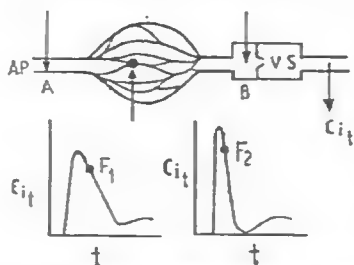


Fig. 8.6. Măsurarea volumului sanguin pulmonar prin diluția indicatorilor. Curbele de concentrație ale indicatorilor (C_i) în funcție de timp (t) permit calculul timpului de tranziție mediu (F_1 și F_2); prin diferență se obține calculul volumului cuprins între punctele A și B. AP, arteră pulmonară VS, ventricul stâng.

Datorită gravitației, volumul sanguin din capilarele pulmonare este inegal repartizat, având tendința de a se acumula în regiunile declive.

Vasomotricitatea circulației pulmonare. La cele mai multe specii animale, circulația pulmonară la adult are posibilități vasoconstrictoare reduse, în comparație cu circulația sistemică, fetală și neonatală.

Vasomotricitatea sectorului vascular pulmonar deține un rol important în reglarea schimburilor gazoase, prin adaptarea perfuziei la ventilație și, deci, pentru menținerea constantă a concentrației sanguine a gazelor respiratorii. Stimulii principali sunt O_2 și H^+ . Celulele musculare netede din pereții vasculari au proprietățile morfologice generale ale musculaturii netede: dimensiuni reduse, reticul endoplasmatic puțin dezvoltat, capacitate mare de a sintetiza elastină, fibre elastice și collagen. Miozina are o activitate ATPazică scăzută, contracția fiind lentă, prelungită.

Inervația adrenergică și colinergică se întâlnește la toate speciile animale. Receptorii alfa sunt mai bine reprezentați ca cei beta. Se pare că fibrele adrenergice au un rol mai important

în plămânul fetal (fiind implicate în răspunsul circulației pulmonare la hipoxie) decât în plămânul adultului.

Numeroase substanțe (droguri, medii etc.) au acțiune asupra circulației pulmonare. Pentru foarte multe din acestea, efectele și modul de acțiune nu sunt clar precizate.

Diferențele care apar de la o specie la alta, existența numeroaselor interacțiuni între substanțe, faptul că sunt repede distruse, iar produșii lor de metabolism nu sunt perfect cunoscuți constituie factori limitanți.

O serie de date au fost însă bine stabilite. Astfel, catecolaminele alfa-adrenergice și angiotensina au acțiuni vasoconstrictoare marcate pe plămânul izolat, dar, *in vivo*, cele mai multe efecte exercitate asupra circulației pulmonare sunt secundare efectelor lor pe circulația sistemică. Existența unui tonus adrenergic permanent este sugerată de faptul că inhibitorii alfa produc o scădere de mică importanță a rezistenței arteriale pulmonare.

Serotonina și prostaglandinele F_1 și $F_{2\alpha}$ au acțiuni vasoconstrictoare mai accentuate comparativ cu circulația sistemică.

Catecolaminele beta și ganglioplegicele manifestă efecte vasodilatatoare asupra vaselor pulmonare contractate în prealabil, ca urmare a hipoxiei, dar nu au nici un efect pe vasele pulmonare normale. De asemenea, nu s-a descris un efect al inhibitorilor beta.

Acetilcolina este un agent vasodilatator dacă acționează pe vasele pulmonare contractate, dar rămâne fără efect dacă acționează asupra celor normale.

Efectele histaminei sunt contradictorii, depinzând de specie, de doză și de predominanța receptorilor H_1 sau H_2 .

Bradikina exercită efecte vasoconstrictoare sau vasodilatatoare, de asemenea în raport de doză și de specie, dar răspunsurile vasodilatatoare sunt cele mai puternice.

Acțiunile serotoninei, bradikinei și histaminei sunt mai reduse la nivelul venelor comparativ cu cel al arterelor.

Stimulul cel mai important al vasomotricității pulmonare este hipoxia alveolară. Efectele sale sunt potențate de acidoza metabolică sau respiratorie, care, prin ele însele, au efecte vasoconstrictoare la nivelul circulației pulmonare.

CO_2 nu are nici un efect specific prin acțiune directă, ci prin intermediul H^+ (vezi Reglarea umorală a respirației).

Efectele hipoxiei asupra circulației pulmonare. Hipoxia produce vasoconstricție în teritoriul arterial pulmonar, implicându-se astfel în adaptările locale ale perfuziei la ventilație; prin acest efect se explică rezistențele crescute din circulația pulmonară fetală, în cursul afecțiunilor respiratorii cronice și la indivizii care locuiesc la altitudine.

Răspunsul presor, prezent la toate speciile, apare la om atunci când $P_{A_{O_2}}$ (presiune parțială a oxigenului la nivelul alveolei) scade sub 70 mmHg și este maxim la valoarea de 35 mmHg a acesteia.

Mecanismul de producere a vasoconstricției hipoxice nu este însă complet elucidat. Se admite existența unei celule chemoreceptoare care recunoaște semnalul hipoxic, urmată de transformarea semnalului în răspuns contractil.

Date experimentale arată că hipoxia alveolară, în mai mare măsură ca hipoxia sanguină, este stimulul principal.

Constricția hipoxică a vaselor pulmonare din timpul vieții fetale scade brutal în momentul primei respirații, ca urmare a ajungerii oxigenului la nivel alveolar, determinând reducerea rezistenței vasculare și creșterea fluxului sanguin pulmonar. Dacă fenomenul se datorează acțiunii directe a hipoxiei asupra musculaturii netede a vaselor pulmonare sau eliberării unor substanțe vasoactive de la nivelul țesuturilor perivascularare nu s-a precizat încă.

Influența acidozei asupra circulației pulmonare. Acidoza determină o vasoconstricție arterială pulmonară, urmată de creșteri cu 3–4 mmHg ale presiunilor în arterele pulmonare (P_m) și o creștere cu aproape 50% a rezistenței în vasele pulmonare. Aceste fenomene apar la valori ale pH-ului cuprinse între 7–7,20.

Răspunsurile sunt identice în acidoza metabolică sau respiratorie și mai accentuate dacă se produc la subiectul aflat deja în stare de hipoxie.

8.2.3.3. Circulația limfatică pulmonară

Plămânul și pleura sunt străbătute de rețele de vase limfatice, situate periarterial, perivenos, peri- și intrabronșic, septal și subpleural, între care există numeroase conexiuni.

Limficele periferice se găsesc foarte aproape (1–2 mm) de septurile alveolare, dar nu pătrund în membrana alveolo-capilară.

Diametrul capilarelor limfatice, aproape totdeauna superior celui al capilarelor sanguine, variază între 100 și 200 μm . Peretele lor este constituit din celule endoteliale, care prezintă joncțiuni deschise, sprijinite pe o membrană bazală subțire și discontinuă și care conțin numeroase vezicule de pinocitoză, atestând fenomenele de transport care au loc la acest nivel. Deși au posibilitatea de contracții pulsatile cu o frecvență de 1–20 contracții/minut și pot genera presiuni de până la 20 mmHg, factorul principal care asigură progresia limfei este reprezentat de mișcările respiratorii.

Vasele limfatice pulmonare sunt prevăzute cu valvule, care permit o circulație unidirecțională a limfei. Posedând o mare permeabilitate, prin limfatice se drenează atât proteinele filtrate care traversează capilarele sanguine, cât și particule care provin din alveole; particulele care nu au fost eliminate prin stratul muco-ciliar traversează epitelul, nu atât pe la nivelul joncțiunilor, cât prin veziculele de endocitoză de la nivelul pneumocitelor I și II, de unde sunt captate rapid de către rețeaua limfatică.

Compoziția în proteine a limfei pulmonare reprezintă aproximativ 75% din cea a plasmiei, iar debitul este de 0,5 l/zi (1–8 ml/oră).

În cazul unei supraîncărcări acute a patului vascular, odată cu creșterea presiunii în capilarele pulmonare, debitul limfatic poate crește foarte mult, atingând aproape de trei ori valoarea normală. Dacă fenomenul de supraîncărcare are un caracter cronic, se produce în decurs de aproximativ trei săptămâni o proliferare limfatică, cu o creștere a debitului limfatic de până la 10–100 ml/oră și, astfel, prin stimularea drenajului de lichid se limitează formarea edemului.

8.2.4. INERVAȚIA PLĂMÂNULUI

Plămânul posedă o inervație vegetativă, implicată în bronhomotricitate, în activitatea secretorie a elementelor epiteliale bronho-pulmonare și în vasomotricitatea circulației pulmonare.

Prezența inervației simpatico-parasimplice de la nivelul epitelului și musculaturii bronșice va fi prezentată ulterior, la reglarea nervoasă a bronhomotricității.

Vasele pulmonare prezintă atât baroreceptori (receptori de întindere), cât și fibre nervoase vegetative aferente și eferente. Receptorii sunt situați atât la baza celor două artere pulmonare, cât și la locul lor de bifurcație. Funcția receptorilor este de a detecta variațiile volumice locale și de a determina reacții reflexe similare celor declanșate de la nivelul zonelor reflexogene ale arterelor sistemice. Stimularea baroreceptorilor sau chemoreceptorilor a acestora din urmă și, mai ales, a sinusului carotidian este urmată de reacții vasomotorii pulmonare.

Vasele pulmonare, fiind vase de capacitanță, reacționează prin variații mari de volum la modificări mici vasomotorii. Căile eferente simpatico-parasimpatice prezintă o densitate mai redusă la nivelul vaselor mici, pentru ca să dispară în cazul celor cu diametrul sub 3 mm.

În afara fibrelor simpatice vasoconstrictoare, vasele pulmonare conțin și filete nervoase simpatice vasodilatatoare ce întregesc efectele căii parasimpatice colinergice.

Căile aferente sunt reprezentate de terminațiile senzitive vagale de la nivelul parenchimului și vaselor pulmonare.

Se descriu terminații nervoase senzitive și în pereții alveolari, conectate la receptori de tip „J”, precum și terminații eferente în legătură cu pneumocitele II, pentru controlul secreției de surfactant.

8.3. MECANICA VENTILAȚIEI PULMONARE

Actul complex al respirației începe cu fenomenele mecanice de distensie și retracție a cuștii toracice, indispensabile ventilației pulmonare ca proces fiziologic de asigurare a schimbărilor gazoase între mediul extern și aerul alveolar.

Mișcările ventilatorii pulmonare realizează primenirea aerului din teritoriul de schimb alveolo-capilar prin procese fizice convective de deplasare și transport în dublu sens al aerului respirat. La baza lor stau diferențe de presiune trașeairiene, transpulmonare și transtoracice din timpul ciclului respirator, realizate cu participarea mișcărilor cutiei toracice, elasticității pulmonare, distensibilității toraco-pulmonare și a vidului iotrapleural.

Sensul dublu de circulație a aerului se realizează ciclic în două etape distincte ale procesului de ventilație:

- *inspirația*, care constă în pătrunderea în plămân a unui volum de aer atmosferic mai bogat în O_2 , față de aerul alveolar, și
- *expirația*, în cursul căreia este eliminat la exterior un volum de aer aproape egal cu cel inspirat și care conține mai mult CO_2 și mai puțin O_2 (coeficientul respirator este 0,8).

Tranzitul de aer între cele două sectoare – alveolar și atmosferic – este urmarea modificărilor de presiune din interiorul sistemului toraco-pulmonar, modificări care se produc prin activitatea mușchilor inspiratori și expiratori, cu participarea toracelui, plămânilor și pleurei. În acest fel, integritatea anatomică și funcțională a fiecărei verigi implicate și a sistemului în întregime apare obligatorie.

Spre deosebire de inspirație, care se produce în mod activ cu participarea obligatorie a mușchilor inspiratori, expirația se realizează pasiv în prima sa parte și doar componenta finală a expirului este activă, necesitând intervenția mușchilor expiratori.

8.3.1. MIȘCĂRILE CUTIEI TORACICE

Mișcările cutiei toracice asigură pătrunderea și ieșirea aerului din plămân atât în condiții obișnuite de repaus sau efort fizic minim, cât și în condiții de inspir sau expir forțat, ca urmare a expansiunii și retracției toraco-pulmonare realizate de contracția și relaxarea mușchilor respiratori.

Forța motrică a inspirului o constituie contracția următorilor mușchi inspiratori: intercostali externi, diafragm, supracostali, pectorali, scaleni, sternocleidomastoidian, mare dinșat. Forța maximă dezvoltată de către aceștia este de până la 10 kg/cm, cu scurtarea până la 50% a fibrei musculare.

Gradarea forței de contracție se poate obține prin variația numărului de unități motorii, într-o mai mică măsură, și prin variații ale frecvenței de contracție.

Măsurarea activității electrice din mușchii inspiratori a arătat că aceasta este dependentă atât de numărul de fibre musculare activate, cât și de frecvența de excitație, constatându-se că, pentru o anumită forță pe care o dezvoltă mușchiul, activitatea electrică crește liniar cu viteza de scurtare.

În ventilația de repaus intervine contracția mușchilor intercostali externi și diafragm, determinând creșterea de volum a cutiei toracice prin mărirea diametrelor acesteia.

Diametrul antero-posterior se mărește datorită orizontalizării coastelor (de la a II-a, până la a VI-a) și mișcărilor de la nivelul articulației primei coaste cu sternul.

Prima pereche de coaste se articulează anterior cu sternul (prin articulația manubrio-sternală) și posterior cu coloana vertebrală, alcătuind operculul toracic. În inspir, manubriul sternal este împins în sus și înainte, luând o poziție de 1° până la 16° față de orizontală. Această mișcare mărește diametrul antero-posterior al jumătății superioare a toracelui și antrenează expansiunea porțiunii anterioare a vârfului pulmonar. Amplitudinea mișcării este redusă în timpul respirațiilor de repaus și prezintă variații individuale în legătură cu profunzimea respirației. Anchiloză care se poate instala la nivelul acestei articulații poate explica eventualele afecțiuni prin hipoventilația zonei.

Contracția mușchilor intercostali externi imprimă coastelor a II-a – a VI-a o mișcare de rotație și orizontalizare în jurul unui ax paralel cu gâtul lor (fig. 8.7).

Faptul că fiecare coastă este mai lungă și cu o direcție mai oblică decât cea superioară explică de ce sternul, executând o mișcare din articulația manubrio-sternală, este împins înainte, mărind diametrul antero-posterior al cutiei toracice.

Contracția mușchilor intercostali externi antrenează în mod obligatoriu ridicarea coastelor, deoarece contracția concomitentă a mușchilor scaleni face din prima coastă un punct superior fix. Dispoziția oblică în jos și înainte a fibrelor intercostalilor externi ușurează, de asemenea, mișcarea de ridicare a coastelor.

Diametrul transversal al cutiei toracice se mărește datorită unei mișcări de rotație care are loc atât la nivelul coastelor a II-a – a VI-a, cât și al coastelor de la a VII-a la a X-a.

Porțiunea medie a coastelor a II-a – a VI-a, fiind mai ridicată față de capete, favorizează creșterea diametrului transversal prin rotirea în jurul unui ax oblic antero-posterior.

Mișcarea de rotație pe care o efectuează coastele de la a VII-a la a X-a se face în jurul unui ax care anterior străbate linia mediană, iar posterior gâturile coastelor, lărgind astfel unghiul realizat de coaste cu coloana vertebrală și mărind diametrul transversal al porțiunii inferioare a toracelui.

Creșterea diametrului vertical, cranio-caudal, este consecința alungirii exclusiv în jos a cavității toracice, care rezultă din coborârea planșeului format de mușchiul diafragm. Acest mușchi este considerat principalul mușchi inspirator, deoarece, prin acțiunea sa, asigură vehicularea unei cote importante din volumele respiratorii (60% din cantitatea de aer ventilat într-o respirație profundă).

Diafragmul este alcătuit dintr-o porțiune centrală tendinoasă și din țesut muscular dispus circumferențial. Are formă de hemisferă (cu diametrul egal cu 20 cm), cu bolta orientată spre cavitatea toracică, cu o suprafață de aproximativ 270 cm².

Funcțional i se disting două porțiuni: costo-sternală și lombară (crurală). În timpul inspirului, porțiunea costo-sternală are o mișcare în jos și înainte, coborând viscerele abdominale și determinând creșterea capacității părții inferioare a toracelui. Rezistența opusă de mușchii abdominali la întinderea peretelui limitează mișcarea viscerelor abdominale în jos, iar contracția în continuare a diafragmului va avea ca urmare ridicarea coastelor inferioare și împingerea înainte a sternului. Porțiunea lombară acționează numai pentru mărirea diametrului vertical al toracelui.

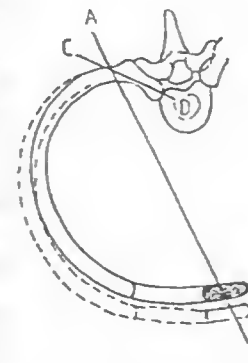


Fig. 8.7. Schema axelor de deplasare a coastelor (AB și CD) pentru perechile de coaste de la a II-a la a VI-a. (---), poziția coastei în inspirație (după Gray).

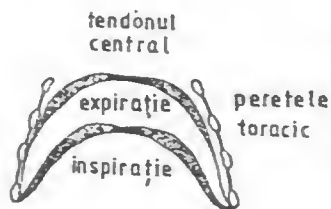


Fig. 8.8. Poziția diafragmului în cursul mișcărilor respiratorii.

medie a mușchiului și amplitudinea excursiilor, cu consecințe importante asupra eficienței ventilației. Dispoziția în boltă a diafragmului este favorizată de clinostatism, de presiunea viscerelor abdominale creată prin contracția mușchilor abdominali și de tracțiunea exercitată de presiunea intratoracică, care este mai mică decât cea atmosferică. Atunci când este paralizată, se deplasează mult în sus, deoarece urmează pasiv depresiunea presională intratoracică (mișcare paradoxală).

Poziția ortostatică, în special dacă musculatura abdominală este relaxată, tracționează în jos diafragmul, dar împiedică sau îngreuează ascensiunea. Această situație devine patologic accentuată la persoanele cu musculatura abdominală slabă și/sau cu ptoză viscerală.

Ventilația forțată presupune o serie de modificări. Pe de o parte, în inspirul profund coloana vertebrală nu mai constituie punct fix. Aceasta va efectua o mișcare de extensie accentuând orizontalizarea coastelor și, prin creșterea suplimentară a volumului toracic, va permite antrenarea unei cantități suplimentare de aer. Pe de altă parte, sunt cointeresați și alți mușchi, în afară de intercostalii externi și diafragm. Mușchii inspiratori accesorii sunt considerați: mușchii pectorali, marele dinjat, sternocleidomastoidianul, trapezul, scapularul, micul dinjat posterior, micul dinjat superior.

Încetarea stimulării mușchilor respiratori este urmată de revenirea, la dimensiunile anterioare inspirației, a tuturor elementelor elastice ale sistemului toraco-pulmonar. Ca urmare, presiunea din interiorul sistemului capătă o valoare superioară celei atmosferice, conducând aerul din interior spre exterior. Expirația de repaus apare astfel ca o mișcare pasivă.

Expulzarea forțată a aerului din plămâni presupune, pe de o parte, participarea suplimentară a unor structuri (contracția mușchilor: abdominali, pătratul lombar, intercostalii interni, micul dinjat posterior, micul dinjat inferior, triunghiularul sternului) iar, pe de altă parte, modificarea comportamentului unor structuri implicate anterior (coloana vertebrală execută o mișcare de flexie, proporțională cu profunzimea expirației). Ultimele două perechi de coaste servesc ca punct de inserție pentru mușchii abdominali și, astfel, se va micșora diametrul antero-posterior.

Ascensiunea suplimentară a diafragmului se datorește, pe de o parte, „aspirației” create prin presiunea subatmosferică din torace, iar, pe de altă parte, faptului că visceralele abdominale sunt împinse în sus prin contracția mușchilor abdominali (fig. 8.8).

8.3.2. MIȘCĂRILE PLĂMÂNILOR

Modificarea dimensiunilor cutiei toracice este urmată de modificări în același sens ale țesutului pulmonar. Acest fenomen, esențial pentru desfășurarea normală a ventilației, se datorește prezenței între foițele seroasei pleurale a unei cantități minime și permanente reîmprospătate de lichid pleural.

Împărțirea plămânului în lobi face ca tracțiunea exercitată asupra parenchimului să fie relativ uniformă. Diferențele care apar între diferite zone se datoresc fie plămânului, fie cuștii toracice.

Porțiunea superioară a toracelui își crește mai mult capacitatea comparativ cu partea inferioară. Faptul că poziția coloanei vertebrale rămâne relativ fixă are ca urmare expansiunea părții anterioare. Expansiunea inegală face posibilă distingerea următoarelor zone:

- o zonă neexpansibilă, situată în jurul hilului;
- o zonă de distensibilitate maximă, cu o grosime de aproximativ 3 cm, situată imediat subpleural;
- o zonă intermediară, în care distensibilitatea este mai mare în sectorul dinspre periferie față de cel orientat central.

Așa cum s-a arătat, cutia toracică nu se distinde uniform, iar efectele creșterii sale de volum se exercită în principal asupra țesutului pulmonar care vine în contact cu părțile mobile. Se poate spune că aceste zone sunt direct expansionate.

Porțiunile din plămân care vin în contact cu porțiuni mai puțin mobile sau statice ale toracelui vor suferi o expansiune indirectă, în sensul că vor fi destinse numai prin deplasarea altor zone pulmonare. Aceste zone sunt: fața posterioară a vârfului pulmonar, fețele posterioare ale plămânilor și suprafețelor pulmonare mediastinale.

Expansiunea țesutului pulmonar este ajutată de alungirea arborelui bronșic și de faptul că în timpul inspirului hilul face o mișcare cu direcție anterioară, inferioară și externă. Pe de altă parte, rețeaua elastică din vase și sistemele de canale ale arborelui bronșic constituie un sistem elastic continuu, care face ca fiecare element să fie legat de structurile vecine, în așa fel încât tensiunile dezvoltate într-un anumit punct să fie transmise tuturor părților componente ale sistemului.

Elasticitatea țesutului pulmonar depinde atât de forța vâsco-elastică pulmonară, cât și de prezența surfactantului pulmonar ca factor de reducere a tensiunii superficiale a peliculei lichidiene alveolare și de evitare a tendinței de colabare a plămânului. La acestea se adaugă extensibilitatea sau complianța toraco-pulmonară, ca variație de volum determinată de variațiile presiunii intraalveolare. În condiții normale, creșterea cu 1 cm³ a presiunii alveolare determină o creștere a volumului pulmonar cu 0,22 litri. Aceeași creșterea a presiunii alveolare realizează o variație de volum toracic doar de 0,13 litri, datorită rezistenței mai mari a cuștii toracice.

Rolul determinant în realizarea variațiilor de volum pulmonare produse de expansiunea și retracția cuștii toracice revine însă variațiilor de presiune negativă, subatmosferică, de la nivelul spațiului virtual pleural.

8.3.3. PLEURA

Seroasa pleurală este formată din două foițe: una care căptușește intim peretele toracic (pleura parietală) și alta aderentă de plămân (pleura viscerală). Între cele două membrane există un strat fin de lichid, redus cantitativ, cu grosime de până la 20 μm, prin intermediul căruia acestea aderă, dar efectuează și o mișcare de alunecare una pe alta.

Dinamica acestui fluid, care este în mod normal un transsudat, face ca la persoanele sănătoase cavitatea pleurală să fie virtuală; numai dezechilibrele privind formarea sau reabsorbția lichidului și a gazului pleural pot să evidențieze o cavitate reală.

Cele două membrane pleurale împreună cu lichidul pleural formează un tot funcțional care domină mecanica respiratorie prin cuplarea pe care o realizează între sistemul pulmonar și peretele toracic. Suprafața pleurală totală este de 1 m².

Deși lichidul pleural se găsește în cantitate redusă (3–15 ml), s-a constatat că în 24 de ore se formează aproximativ 600–700 ml de lichid, care este aproape în întregime resorbit prin sistemul venos din straturile pleurei (80–90%) și prin limfatice (10–20%).

Mișcarea lichidului este determinată de gradientele de presiune hidrostatică și coloidosmotică (echilibrul Starling) care se stabilesc între cele trei teritorii: capilarele pleurei viscerele, spațiul pleural și capilarele pleurei parietale (fig. 8.9).

Între sectorul vascular al pleurei parietale (tributar circulației sistemice) și spațiul pleural se creează o diferență de presiune (9 cmH₂O), care imprimă lichidului direcția spre spațiul pleural, deci favorizează formarea sa. Cantitatea de lichid astfel formată, în unitatea de timp, este dependentă de permeabilitatea capilarelor și de suprafața pleurei parietale. Coeficientul de filtrare este cu 5–10% mai mare față de cel al capilarelor din alte sectoare (mușchi). Modificarea permeabilității și a presiunilor poate influența cantitatea de lichid din spațiul pleural. Odată format, lichidul pleural se absoarbe aproape în întregime datorită gradientelor presionale care se stabilesc între spațiul pleural și capilarele pleurei viscerele.

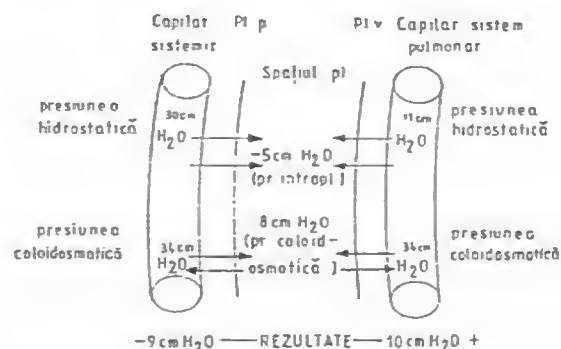


Fig. 8.9. Formarea și reabsorbția lichidului pleural.

Foița viscerală a seroasei pleurale este vascularizată de ramuri aparținând circulației pulmonare. Regimul presional al acestui sector capilar orientează lichidul din spațiul pleural înspre aceste capilare, favorizând deci absorbția.

Deși echilibrul între filtrare și reabsorbție este deplasat net în favoarea reabsorbției (vascularizația pleurei viscereale este mai bogată), nu se produce totuși o „secare” a cavității pleurale. O interpretare a acestui fenomen poate fi făcută prin apariția punctelor de contact între cele două foițe. La nivelul acestor puncte are loc o întindere a foiței viscereale care accentuează presiunea negativă din spațiul pleural, opunându-se absorbției complete a lichidului.

Drenajul fracțiunii lichidiene din spațiul pleural se face și pe cale limfatică, exclusiv la nivelul pleurei parietale.

În cavitatea pleurală nu se găsește aer, iar dacă acesta apare (accidental sau introdus terapeutic) este imediat absorbit în sângele venos. Presiunea parțială a gazelor din sângele venos ($PO_2 = 40$ mmHg; $PCO_2 = 46$ mmHg; $PN = 573$ mmHg; $PH_2O = 47$ mmHg) este de 706 mmHg, deci mai redusă față de presiunea aerului introdus sau pătruns la presiunea atmosferică. Se creează astfel un gradient presional de 54 mmHg (corespunzător la 71 cmH₂O).

Dinamica lichidului și gazelor în spațiul pleural asigură funcția pleurei de a menține plămânul atașat la cutia toracică, asigurând astfel desfășurarea la parametrii optimi ai ventilației pulmonare.

Se descriu două presiuni pleurale: presiunea pleurală fluidă și presiunea pleurală de suprafață. Presiunea pleurală fluidă se datorește lichidului din cavitate și valoarea sa provine din însumarea presiunilor de retracție elastică a plămânului și a pleurei, având valori mai negative decât presiunea de retracție a plămânului. Presiunea pleurală de suprafață este singura implicată în mecanica ventilatorie.

Determinarea presiunii pleurale. Presiunea pleurală lichidă se determină prin introducerea în cavitatea pleurală a unui ac adaptat la un manometru, iar presiunea pleurală de suprafață se măsoară la animalele de experiență printr-o separare bruscă a celor două foițe.

Datorită retracției elastice a plămânului, în cavitatea pleurală se înregistrează o presiune de aproximativ -5 cmH₂O la sfârșitul inspirului. Valoarea presiunii intrapleurale nu este uniformă în diferite momente ale procesului de ventilație și în diferite puncte de pe suprafața plămânului. Modificările de poziție influențează, de asemenea, valoarea presiunii pleurale, sugerând dependența sa de forța de gravitație. Cunoașterea variațiilor presiunii intrapleurale este importantă în măsura în care exercită o influență directă asupra volumului alveolar și implicit asupra distribuției ventilației.

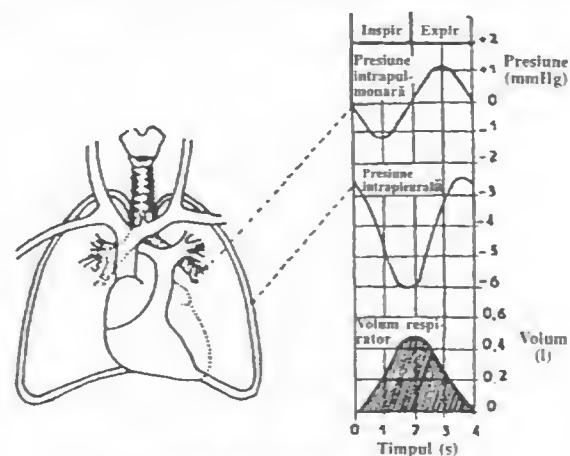


Fig. 8.10. Gradientele de presiune intrapulmonară și intrapleurale din inspir și expir.

Astfel, în timpul unei respirații liniștite, distribuția ventilației este influențată de trei factori: a) rezistența căilor aeriene, mai puțin importantă în respirația de repaus; b) proprietățile elastice ale plămânului; c) gradientele de presiune pleurală și pulmonară (fig. 8.10).

Când sistemul toraco-pulmonar se află în poziție expiratorie maximă (conține volumul rezidual), presiunea pleurală este la vârf de -2 cmH₂O și la bază de -5 cmH₂O. În regiunile declive, presiunile transmurale bronșice sunt negative, căile aeriene de calibru mic sunt închise și aerul este blocat, reținut în spatele bronhiolilor terminale, care sunt colabate. Volumele pulmonare în aceste regiuni bazale sunt la valorile lor minime. În schimb, regiunile apicale se găsesc la nivelul volumului rezidual, deci aproximativ 40% din capacitatea lor totală.

În cursul inspirației normale, presiunea transpulmonară crește cu 6 sau 7 cmH₂O, căile aeriene bazale rămân închise, deci unitățile pulmonare bazale nu-și schimbă volumul. Dimpotrivă, regiunile apicale primesc aproape în întregime volumul ventilat.

La sfârșitul unui expir de repaus, când în plămân se găsesc volumul de aer rezidual și volumul expirator de rezervă, presiunea pleurală este de -8 cmH₂O la nivel apical și -1 cmH₂O la nivel bazal. În aceste condiții, pe ansamblul plămânului, căile aeriene sunt deschise, dar, totuși, volumele pulmonare apicale sunt mai mari comparativ cu cele bazale.

În timpul inspirației însă, o variație de 6 sau 7 cmH₂O antrenează o creștere a volumelor pulmonare și a ventilației mai mare în regiunile bazale (care sunt pe panta ascendentă a curbei volum-presiune) (fig. 8.11) decât în regiunile apicale (care se plasează pe porțiunea orizontală a acestei curbe).

La sfârșitul unui inspir maxim, presiunile pleurale se situează în jurul valorilor de -33 cmH₂O la baza plămânului și de -40 cmH₂O la vârf.

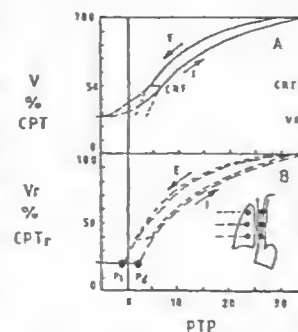


Fig. 8.11. A: Relația presiune/volum globală în plămânul uman. B: Relația presiune/volum regională. CRF, capacitate reziduală funcțională. PTP, presiune transpulmonară. CPT, capacitate pulmonară totală. r, regional. V, volum. VR, volum rezidual. E, expir. I, inspir. Pl, presiune de închidere. Pd, presiune de deschidere.

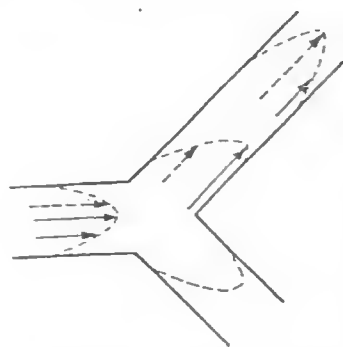


Fig. 8.12. Regim de curgere „în condiții de intrare” (după Teodorescu Exarcu, 1979).

afară de aerul rezidual, în plămâni se găsește și volumul expirat de rezervă, formând capacitatea reziduală funcțională (CRF).

8.3.4. ECUAȚIA MIȘCĂRII SISTEMULUI TORACO-PULMONAR

Pentru realizarea măririi de volum a cutiei toracice, contracția mușchilor respiratori dezvoltă o forță (P_{m}), care trebuie să anuleze și să depășească o serie de forțe care iau naștere în cadrul sistemului toraco-pulmonar și care se opun acestei creșteri de volum. Acești factori opoziți sunt:

a) presiunea elastică (P_{el}), echivalentă cu energia care se acumulează în sistem și care este redată integral după încetarea acțiunii forței care a generat-o. Dispoziția tridimensională a elementelor elastice în cadrul sistemului toraco-pulmonar explică mărirea de volum (V) a sistemului sub acțiunea forței definimante (P_{m}) într-o relație de proporționalitate directă:

$$P_{\text{el}} = F_{(v)}$$

b) presiunea vâscoasă (P_{vis}) este forța opozantă creată prin frecare atât în conductele aeriene (componenta gazoasă a P_{vis}), cât și în structurile neelastice ale plămânului (componenta tisulară a P_{vis}). Valoarea ambelor componente este direct dependentă de viteza de mișcare a sistemului și, deci, implicit de viteza de circulație a aerului în sistem (V):

$$P_{\text{vis}} = F_{(v')}$$

c) presiunea inerțială (P_{in}), care depinde de accelerația debitului (V'):

$$P_{\text{in}} = F_{(v'')}$$

Această componentă opozantă este neglijabilă când fluxul de aer este lent, deci nu realizează curgeri în regim turbulent.

Dimensiunile relativ reduse ale conductelor și numărul mare de bifurcații prezente la nivelul arborelui bronșic nu permit instaurarea în acest sistem a unui regim de curgere complet laminar sau turbulent. Fluxul de aer capătă caracteristicile unei deplasări în „condiții de intrare”, adică la nivelul fiecărei bifurcații, straturile modificându-și viteza și poziția unele față de altele (fig. 8.12).

Aprecierea caracterului curgerii aerului se face prin utilizarea numărului Reynolds (Re):

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta}$$

în care: ρ = densitatea; v = viteza liniară de curgere a moleculelor de aer; d = diametrul tubului; η = vâscozitatea. Astfel, valori mai mici de 2 000 indică un regim de curgere laminar, iar peste 2 000 apariția turbulențelor.

8.3.4.1. Rezistența pulmonară

Intensitatea proceselor ventilatorii depinde și de rezistența pulmonară.

Rezistența pulmonară totală cuprinde rezistențele cutiei toracice și rezistențele pulmonare, acestea din urmă cuprinzând rezistența țesutului pulmonar și rezistența căilor aeriene. La rândul său, rezistența căilor aeriene cuprinde rezistența căilor aeriene superioare (gură, faringe și glotă) și rezistența căilor aeriene inferioare, cuprinzând, pe de o parte, traheea și marile bronhii cu un diametru de peste 2 mm (rezistența centrală) și, pe de altă parte, micile căi aeriene, cu diametrul sub 2 mm (rezistența periferică).

Rezistența pusă de căile aeriene la fluxul de aer (rezistența la flux) are valori între 0,3–3 cm H_2O/s .

Rezistența tisulară se poate calcula prin scăderea din rezistența pulmonară totală a rezistenței opuse de căile aeriene la fluxul de aer. Are valori de aproximativ 20–30% din valoarea rezistenței pulmonare.

Rezistențele la nivelul cutiei toracice sunt în mod obișnuit egale sau puțin mai mari față de cele ale căilor aeriene. Rezistențele tisulare pulmonare și cele ale căilor aeriene periferice au valori neglijabile, iar cele ale căilor aeriene superioare aproape egale cu ale căilor aeriene inferioare.

Acești rezistențe situate în serie, care se însumează, li se adaugă, în cursul respirației nazale, rezistența foselor nazale, care este de 2–3 ori mai mare decât restul rezistențelor însumate (fig. 8.13).

Valurile rezistenței pulmonare totale sunt în jur de 5–6 cm H_2O/s .

Căile aeriene au o rezistență dependentă de vâscozitatea și densitatea gazului și invers proporțională cu diametrul căilor respiratorii. Rezultă că factorii care modifică diametrul căilor aeriene vor produce modificări semnificative ale rezistenței.

Rezistența căilor aeriene crește liniar cu vâscozitatea și densitatea gazului inspirat, atât în condițiile respirației efectuate la presiune atmosferică, cât și în condiții de hiperbarism, până la 3–4 atmosfere. Creșterea travaliului respirator în condiții de hiperbarism este unul din factorii limitanți ai efortului fizic în timpul imersiei; în aceste condiții este necesară înlocuirea azotului cu un gaz mai puțin dens, ca, de exemplu, heliu.

Rezistențele variază în raport cu volumul după o relație hiperbolică. Mai frecvent se utilizează relația conductanță-volum, în care variația este de tip liniar.

Măsurători făcute prin cateterism arată că nu există diferențe ale rezistenței la nivelul bronhiilor de calibru mare și al celor de calibru foarte mic. În schimb, la nivelul bronhiilor de calibru mediu, rezistența este de până la 10 ori mai mare atunci când volumul pulmonar crește de la 1/3 la 2/3 din capacitatea vitală. Această creștere se datorește tonusului bronhomotor vagal, deoarece, după vagotomie, conductanța este independentă de volum.

Tonusul bronhomotor. Relația dintre rezistența căilor aeriene și tonusul mușchilor bronșici este complexă, cunoașterea sa fiind îngreuiată de faptul că datele experimentale obținute la animale sau pe plămânul izolat sunt dificil de transpus la plămânul uman *in situ*. Un anumit mediator poate avea efecte contrarii în diferite zone ale căilor respiratorii sau chiar în același teritoriu, după cum respirația este calmă sau forțată. Acțiunea unor mediatori depinde nu numai de doză, ci și de repartitia și densitatea receptorilor (a se vedea reglarea bronhomotricității).

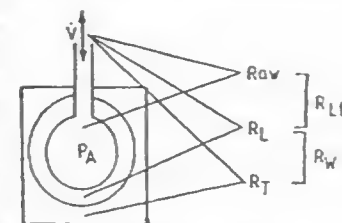


Fig. 8.13. Rezistența toraco-pulmonară totală (R_t) și componentele sale. R_v , rezistența căilor aeriene. R_L , rezistența pulmonară. R_{tis} , rezistența tisulară pulmonară. R_p , rezistența de la peretele toracic, (după Meyer, 1980).

8.3.5. TRAVALIUL VENTILATOR

Mușchii antrenați în ventilație efectuează împotriva rezistențelor opuse de sistemul toraco-pulmonar un lucru mecanic (W) definit prin relația:

$$W = P \times V$$

Calcularea sa se face prin planimetria curbei volum-presiune și poate fi apreciat pe baza consumului de O_2 al mușchilor ventilatori. În situații normale, lucrul mecanic se efectuează numai în timpul inspirului. Valorile normale variază între 1,5–4 g·cm/ml.

Valori crescute ale reculului elastic pulmonar sau/și ale rezistenței la flux antrenează creșteri ale valorilor lucrului mecanic.

Cunoașterea jocului de forțe care acționează în momentul fazelor respiratorii informează asupra calităților sistemului toraco-pulmonar și permite să se evalueze cheltuielile energetice necesare producerii acestui act fiziologic.

8.3.6. CURBA VOLUM—PRESIUNE PULMONARĂ

Sistemul toraco-pulmonar se comportă ca un sistem elastic cu unele particularități.

Un corp perfect elastic își modifică lungimea cu o anumită valoare, proporțională cu forța care îl deformează, după o relație de liniaritate, până este atinsă limita elastică a corpului. Expresia acestei relații este coeficientul de elasticitate:

$$e = \frac{f}{l}$$

în care: e = coeficientul de elasticitate; f = forța deformantă; l = lungimea corpului.

Îndepărtarea forței deformante este urmată de perfectă revenire a corpului elastic la dimensiunile inițiale. În condițiile sistemului toraco-pulmonar, forța deformantă este reprezentată de contracția mușchilor respiratori. Intricarea fibrelor elastice cu cele de collagen conferă un comportament specific acestui sistem elastic. Astfel, limita elastică a sistemului nu este atinsă, deoarece fibrele de collagen au un modul de elasticitate mare, care împiedică distensibilitatea plămânului peste anumite limite, funcționând deci ca un mecanism limitant; între presiunea aplicată și alungire nu există o relație de liniaritate decât în domeniul de desfășurare al respirației liniștite.

Relația stabilită între variația de volum a sistemului toraco-pulmonar și variația de presiune care o inițiază a fost exprimată sub forma unui raport, denumit inițial *elastanță pulmonară*:

$$E = \frac{\Delta P}{\Delta V}$$

în care E = elastanța pulmonară; ΔP = variația de presiune care induce o anumită variație de volum (ΔV).

Relația inversă a elastanței, denumită *complanță pulmonară*, permite evaluarea calităților elastice ale sistemului:

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta P}$$

în care: C = complanța pulmonară; ΔV = variația de volum; ΔP = variația de presiune.

Complanța pulmonară poate fi astfel definită ca o variație de volum necesară pentru a induce o variație de presiune transpulmonară de 1 cmH₂O (valori normale = 0,200 l/cmH₂O).

Înregistrările grafice efectuate au arătat că cele două curbe, în inspir și în expir, nu sunt superpozabile: presiunea din timpul inspirului este mult mai mare decât în expir, dar volumul sistemului este același. Forma generală a curbei inspiratorii și a celei expiratorii este sigmoidă și are caracter exponențial la valori inferioare capacității reziduale funcționale (CRF) (vezi fig. 8.10).

Semnificația punctelor de pe curbă este diferită, în funcție de poziția față de CRF. La valori mai mari decât CRF curba este de tip exponențial, reflectând proprietățile elastice ale plămânului. La valori mai mici

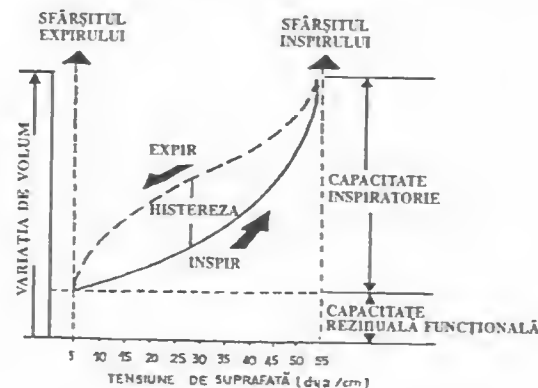


Fig. 8.14. Histereza pulmonară.

decât CRF curba capătă un aspect sigmoid, care însă se pare că este un artefact de determinare (compresiunea balonului esofagian evidențiază presiunea transpulmonară). În practică, explorarea funcțională nu utilizează acest aspect al curbei volum/presiune.

8.3.6.1. Histereza pulmonară

Incapacitatea sistemului elastic toraco-pulmonar de a urma căi identice la aplicarea unei forțe și la revenire după încetarea acțiunii forței deformante se numește histereza (fig. 8.14). Aspectul fenomenului de histereza este dependent de volumul de aer vehiculat și de starea de inflație a plămânului anterioară măsurărilor.

Histereza este mică în momentul inițial al inspirului (aproape de CRF) și crește odată cu volumul aerului inspirat.

Dacă inspirația pornește de la momentul când sistemul toraco-pulmonar se află în poziție expiratorie maximă (conține numai aer rezidual) valorile histerezei sunt mari. Valorile histerezei sunt mai reduse dacă plămânul este ventilat deja cu un volum de aer.

Valorile mari ale histerezei se însoțesc de o reducere a valorilor complanței pulmonare. Este suficientă o singură inspirație până la CPT pentru ca histereza să scadă și complanța să crească cu 20%, iar după mai multe inspirații, cu aproximativ 50%. La baza fenomenului de histereza pulmonară stau vâsco-elasticitatea țesutului pulmonar, prezența surfactantului, starea bronhiolilor și a unității respiratorii.

Vâsco-elasticitatea țesutului pulmonar. S-a constatat că deformarea corpurilor sub acțiunea unei forțe de întindere nu are loc instantaneu cu acțiunea forței deformante. Ea se traduce printr-o alunecare a țesuturilor și rearanjare moleculară, care generează frecare în interiorul structurilor (vâscozitate). Modificările produse antrenează energie mecanică, producere de căldură, dar și o întârziere între întindere și efectul de deformare. Când întinderea încetează, deformarea nu dispare imediat și structurile nu revin instantaneu la proprietățile lor inițiale.

În cazul în care structurile sunt supuse unor variații ciclice rapide de tensiune, apare un decalaj între întindere și revenire, iar bucla înregistrează fenomenul de histereza.

În acest fel, vâsco-elasticitatea țesutului pulmonar, care după întindere nu revine instantaneu la poziția de echilibru ci păstrează câteva momente o „deformare reziduală”, face să se înregistreze o buclă V/P cu atât mai largă, cu cât variațiile ciclice de presiune sunt mai rapide.

Prezența surfactantului. Prezența filmului tensioactiv alveolar determină un răspuns întârziat la variațiile ciclice ale suprafeței alveolare. Măsurarea T_s (tensiune superficială) a surfactantului pulmonar

arată că valoarea sa crește treptat funcție de viteza de întindere. Atunci când variațiile ciclice ale suprafeței alveolare sunt mai rapide, bucla histercei este mai largă, fapt datorat probabil timpului necesar pentru aranjarea moleculelor de surfactant din profunzimea filmului lichidian.

Rolul binecunoscut al surfactantului în scăderea T a filmului endo-alveolar implică o creștere a complianței în același timp cu scăderea tendinței la colaps a alveolelor. În acest fel, la histereza de elasticitate se adaugă histereza de suprafață.

Bronhiile și unitățile respiratorii. Sunt deschise în proporție diferită în inspir și expir, la o aceeași presiune. Ca urmare, la volumele mici inferioare CRF, care se găsesc la sfârșitul expirației, presiunea transpulmonară are valori foarte scăzute, uneori chiar negative, și un mare număr de bronhiole sunt colabate. În timpul inspirației care urmează, aceste bronhiole se deschid numai dacă valurile tensiunii transpulmonare sunt crescute, ceea ce înseamnă că la începutul inspirației presiunea transpulmonară se aplică numai la fracțiunile volumului pulmonar al căilor aeriene care sunt deschise. Complianța este deci scăzută, deoarece, pentru o presiune dată, variația de volum este proporțională cu volumul la care această presiune este aplicată.

Pe măsură ce presiunea crește, în timpul inspirației sunt deschise tot mai multe căi aeriene, ceea ce înseamnă noi teritorii pentru ventilație. La o anumită valoare a presiunii, care poate fi numită „presiune de deschidere completă a căilor aeriene”, relația P/V este aproape identică cu cea care se înregistrează în timpul expirului, dar înregistrarea arată totuși o ușoară deviere spre dreapta, deviere proporțională cu presiunea care a fost necesară pentru deschiderea căilor aeriene. Din contră, la începutul expirației (deci când sistemul pulmonar se află în CPT), toate căile aeriene sunt (teoretic) deschise. În aceste condiții, variațiile presiunii transpulmonare sunt aplicate la toate unitățile pulmonare, deci, pentru o presiune dată, volumul este mai mare decât în timpul inspirației, când o parte din unitățile pulmonare sunt închise.

Faptul că redeschiderea căilor aeriene necesită o valoare mai mare decât cea înregistrată când aceste căi se închid se explică prin aceea că la începutul inspirației diametrul căilor aeriene și cel al alveolelor se găsesc la valoarea sa minimă și că forțele de suprafață, care au o valoare invers proporțională cu raza, prezintă o valoare maximă.

Fenomenele de suprafață intervin în explicarea buclei volum-presiune atât prin fenomenul de histereza, cât și prin fenomenul de „recrutare” progresivă a teritoriilor alveolare în timpul inspirației.

S-a constatat că presiunea la care bronhiile suferă procesul de colabare depinde de mai mulți factori, și anume: bronhomotricitate, calitățile pereților căilor aeriene, tracțiunile parenchimatose care se exercită asupra pereților alveolari, calitățile stratului de surfactant prezent în bronhiole și alveole și presiunea transmurală a bronhiolilor și alveolelor. Alveolele pulmonare suferă presiuni pe ambele fețe pentru că interiorul unei alveole constituie exteriorul celei vecine, astfel încât, în mecanica respiratorie, peretele alveolar poate fi considerat ca unitate anatomică, nu ca element separat, ci component al unei rețele.

Forțele care se aplică la nivelul peretelui alveolar sunt următoarele:

- presiunea gazoasă alveolară din interiorul (P_i) și din exteriorul (P_e) alveolei;
- forțele exercitate asupra alveolelor de către peretele celorlalte alveole. Aceste forțe, reprezentate ca presiuni, pot fi notate în funcție de suprafața alveolară, P_u și P_v , unde P_u reprezintă forțele (presiunile) aplicate din interior, iar P_v presiunile aplicate la suprafața alveolară din exterior;
- tensiunile elastice dintre fețele peretelui alveolar, care dezvoltă o presiune de retracție alveolară.

În condiții statice, aceste forțe sunt în echilibru și, deci, rezultanta lor este nulă:

$$(P_i - P_e) + (P_u - P_v) - P_e = 0$$

Pentru alveolele situate subpleural, ecuația se modifică, datorită razei alveolare mari.

Pentru alveolele situate în grosimea parenchimului pulmonar, forțele de întindere tisulară (P_c) echilibrează forțele intraparietale de retracție și elastice. Rezultă că în timp ce alveolele subpleurale (P_e) sunt supuse presiunii transpulmonare, alveolele intrapulmonare sunt supuse tracțiunilor tisulare.

8.3.6.2. Surfactantul pulmonar

Epiteliul alveolar este acoperit de o peliculă subțire de lipoproteine tensioactive, care au roluri deosebit de importante în funcționalitatea plămânului. Principalul constituent al acesteia este surfactantul pulmonar.

El conferă plămânului o parte din proprietățile sale elastice, ca urmare a scăderii tensiunii superficiale:

- asigură stabilitatea formei alveolelor și distensia plămânului;

- împiedică filtrarea lichidelor din interstițiu și capilare spre alveolele pulmonare de către stratul hidrofof de suprafață;
- favorizează emulsionarea particulelor inhalate, ușurând procesul de fagocitare a macrofagelor.

Grosimea stratului endoalveolar al peliculei lipoproteice este de 10-100 nm, reprezentând aproximativ 3% din grosimea barierei alveolo-capilare. Ea este mai bine reprezentată în spațiile depresionare intercapilare, precum și în neregularitățile și pliurile alveolare.

Pelicula din interiorul alveolelor cuprinde:

- o componentă glicoproteică, unde predomină sialomucinele, legată intim de partea externă a membranei celulei epiteliale alveolare ce funcționează ca receptor și traductor de mesaje moleculare;

- o componentă apoasă (bazală sau hipofază), în compoziția căreia sunt incluse: fosfolipide, proteine și mucopolizaharide;

- o peliculă tensioactivă, osmofilă, foarte subțire, care constituie interfața țesut/aer alveolar, bogată în surfactant pulmonar.

Lipoproteinele tensioactive ale surfactantului apar la microscopul electronic sub trei forme, între ele existând relații de continuitate (fig. 8.15):

- a) corpi lamelari ca organite intracitoplasmice ale pneumocitelor II;

- b) structuri mielinice tubulare răspândite în hipofază, organizate în rețea. Aceste structuri nu sunt abundente în mod obișnuit, dar numărul lor crește în circumstanțe patologice (în particular în cursul intoxicațiilor cu O_2);

- c) film lipoproteic endoalveolar.

Concentrația în fosfolipide a acestuia este dată în tabelul următor (tabelul 8.1).

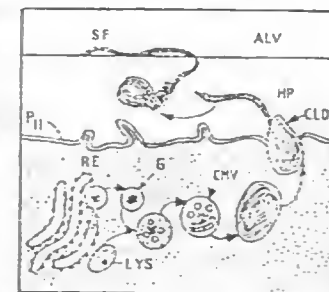


Fig. 8.15. Secreția de surfactant pulmonar (SF) (imagine de microscopie electronică). ALV, alveolă. HP, hipofază apoasă. CLD, corp lamelar osmofil. P II, pneumocit de tip II. RE, reticul endoplasmatic. G, aparat Golgi. CMV, corp multivesicular. LYS, lizozomi.

TABELUL 8.1

Concentrația fosfolipidelor din surfactant

	Concentrație (%)
Glicerofosfatide	
Lecitina (fosfatidilcolina: PC)	65
- saturată: dipalmitoil PC	50
- nesaturată	15
Lizolecitina (monoenoic)	5
Fosfatidiletanolamina	10
- simplă	
- mono- sau dimetil	
Fosfatidilserina sau fosfatidilinozitolul	<5
Fosfatidilglicerolul	5
Stigomelina	5-10
Trigliceride	<5
Cholesterolul	5

Principală fracțiune lipidică a surfactantului o constituie lecitinile saturate, în special dipalmitoil-fosfatidilcolina (DPFC). Aceasta conferă surfactantului rezistență la oxidări și reprezintă o adaptare a interiorului alveolei la O_2 adus prin inspirație.

Surfactantul pulmonar este insuficient în fibrozele primare și secundare, la fumători și în stresul oxidativ, ca urmare a dezechilibrelor create între radicalii liberi și enzimele antioxidante.

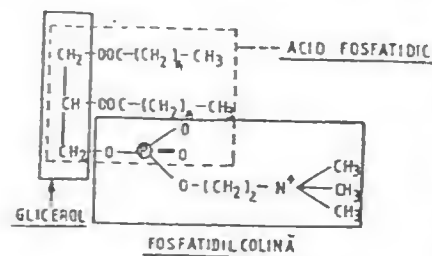


Fig. 8.16. Călea de sinteză a dipalmitoil-fosfatidilcolinei.

adult. Nu este bine cunoscut felul în care stratul este îndepărtat din alveole.

În timpul vieții fetale, surfactantul începe să se sintetizeze numai după naștere. Sinteza de surfactant este stimulată de către glucocorticosteroizi și tiroxină și este inhibată după tiroidectomie.

Sindromul de insuficiență respiratorie se poate datora uneori sintezei insuficiente sau absenței surfactantului pulmonar. Inactivarea surfactantului prin lichide de aspirație sau transsudare favorizează procesele de filtrare capilară spre alveole, accentuând obstrucția bronșică.

În boala membranelor hialine a nou-născutului este vorba de absența congenitală a surfactantului pulmonar, incompatibilă cu viața.

8.4. VENTILAȚIA PULMONARĂ

Ventilația pulmonară, ca proces dinamic ciclic de introducere și expulzie a aerului din căile respiratorii, depinde de profunzimea fiecărei respirații și de numărul acestora în unitatea de timp. Inspirația constă în deplasarea aerului atmosferic în plămâni și se realizează printr-un mecanism activ. În timpul inspirului, contracția mușchilor inspiratori crește diametrele: vertical, antero-posterior și transversal, ale cuspilor toracice, determinând accentuarea presiunii negative (subatmosferice) pleurale, dublată de creșterea volumului toraco-pulmonar (fig. 8.17).

Presiunea intrapleurală scade de la 4-6 mmHg, în repaus, la -10, -15 mmHg, în timpul inspirului, putând atinge -50, -60 mmHg în inspirul profund.

Ca organ fibro-elastic dilatabil în cavitatea toracică închisă, plămânul urmează cu fidelitate mișcările cuspilor toracice, prezentând variații de presiune și volum în același sens cu ale acestora.

Datorită creșterii presiunii negative și volumului toraco-pulmonar, aerul atmosferic se deplasează în inspir spre teritoriul de schimb alveolo-capilar.

În expir, revenirea pasivă (relaxarea) a mușchilor inspiratori, întregită de contracția musculaturii expiratorii, reduce diametrele cuspilor toracice, cu consecințe presionale și volumetrice inverse celor din timpul inspirului. Presiunea negativă intratoracică scade progresiv, ajungând să depășească valoarea presiunii atmosferice cu +6 +8 mmHg în condiții de repaus. În expirul forțat, presiunea intratoracică pozitivă poate crește până la +60 mmHg.

Presiunea coloanei de aer din plămâni, deși prezintă valori mai mici, variază în timpul ciclului respirator în același sens cu variațiile presiunii toracice și pleurale.

Viteza de deplasare a aerului în timpul inspirației este de 20-30 cm/s în porțiunea inițială a căilor respiratorii. Ea scade progresiv la nivelul căilor respiratorii inferioare, ajungând la valoarea de 0 în alveolă.

Secreția de surfactant are loc în special la nivelul pneumocitelor II, cu participarea reticulului endoplasmatic, aparatului Golgi, corpurilor multiveziculare și corpurilor lamelari.

Excreția merocrină a corpurilor lamelari este stimulată de pilocarpină și blocată de atropină. Și celulele Clara secretă la nivelul bronhiolilor surfactantul care contribuie la stabilitatea bronhiilor. S-a demonstrat că DPFC poate fi sintetizată și de către macrofagele alveolare.

Dintre căile de sinteză la nivel pulmonar a surfactantului, cea mai importantă este cea pornită de la citidin-difosfatcolină (fig. 8.16). În prezența sa, tensiunea superficială alveolară scade de 7-14 ori.

Perioada de înjumătățire este de aproximativ 15 ore la animalele mici și în jur de 48 de ore la omul

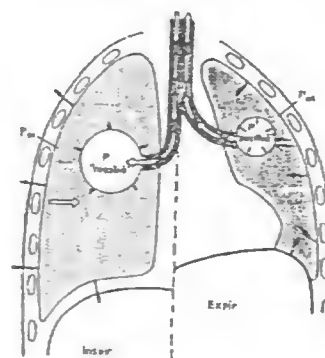


Fig. 8.17. Variațiile presionale și volumetrice din timpul inspirului și expirului.

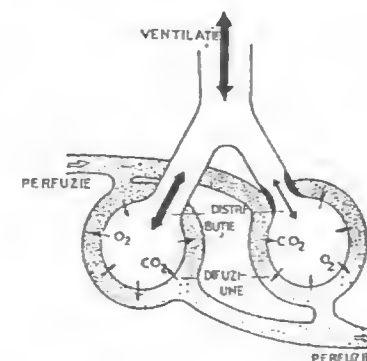


Fig. 8.18. Relațiile perfuzie-difuziune la nivel alveolo-capilar.

În expir, viteza de deplasare a aerului expirat este mult mai mare, atingând +60, +80 mmHg în expirul forțat.

Variațiile presiunii toraco-pulmonare din timpul ciclului respirator mobilizează convectiv volume de aer variabile între aerul atmosferic și aerul alveolar.

Din volumul de aer inspirat în condiții normale de repaus, doar 2/3 ajung până la nivelul teritoriului alveolar. Aproximativ 1/3 din fracția de aer inspirată nu participă la schimburile gazoase pulmonare, întrucât rămâne în spațiul mort anatomic al căilor respiratorii superioare. Aceasta înseamnă că la nivelul alveolelor vor ajunge numai 350 ml de aer proaspăt din cei 500 ml inspirați, la care se adaugă 150 ml de aer alveolar reinspirat, prezent în spațiul mort din timpul expirației precedente. Deși scade eficiența ventilației alveolare, spațiul mort împiedică variațiile mari ale concentrației și presiunii parțiale ale gazelor respiratorii, participă la încălzirea și umidifierea aerului inspirat și asigură un raport constant al aportului de O_2 și eliminării de CO_2 .

La nivel alveolo-capilar, nu toate alveolele sunt egal ventilate sau perfuzate. Raportul normal, de 0,8, dintre ventilație și perfuzie se modifică în numeroase circumstanțe fiziologice și patologice. În poziție ortostatică, de exemplu, există alveole din zona apicală a plămânului puțin sau deloc perfuzate. Numărul alveolelor neperfuzate crește dacă se reduce debitul cardiac sau dacă scade presiunea în artera pulmonară. În sectorul neperfuzat al plămânului, aerul alveolar are compoziție identică sau apropiată de cea a aerului inspirat deoarece schimbul gazos alveolo-capilar nu are loc. Acesta este spațiul mort alveolar fiziologic sau patologic, reprezentat de volumul de aer din teritoriul alveolo-capilar neperfuzat. Modificarea indicelui ventilație/perfuzie poate fi ori discordantă, ca urmare a afectării numai a unuia din cei doi termeni ai raportului, sau adaptativă, cu variații în același sens (fig. 8.18).

8.4.1. METODE DE STUDIU AL VENTILAȚIEI PULMONARE

Una din cele mai simple modalități de apreciere a ventilației pulmonare este înregistrarea mișcărilor respiratorii cu ajutorul pneumografelor de diferite tipuri. Graficul obținut - *pneumograma* - este format dintr-o succesiune de unde ascendente și descendente, cu un raport de 1: 2 între durata pantei ascendente a inspirului și cea descendentă a expirului. Expirul, fiind un fenomen mecanic predominant pasiv, se produce mai lent, având durata mai mare.

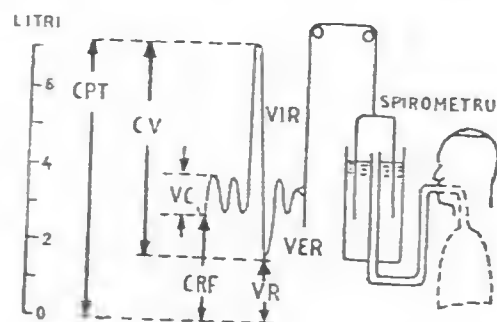


Fig. 8.19. Înregistrarea spirografică a volumelor pulmonare.

Frecvența mișcărilor respiratorii este în medie de 14–18 respirații pe minut, cu variații în funcție de vârstă, sex, temperatură, efort etc. La nou-născut, frecvența respirației este de 40–45/min; la femeie, 16–18/min și la bărbat, 14–16/min.

Variații importante apar în efort, în funcție de intensitatea și durata acestuia. În efortul ușor, frecvența crește doar la 20–24 de respirații/min. Creșterea frecvenței respiratorii poartă numele de tahipnee sau polipnee, iar scăderea – bradipnee.

Pneumografia oferă informații utile și în ceea ce privește stabilirea tipului respirator – superior, inferior sau abdominal. La femei, predomină tipul costal superior, iar la copii, tipul respirator abdominal. La bărbați, respirația este de tip costal inferior în majoritatea cazurilor.

Capacitatea ventilatorie și volumele de aer ventilat se determină cu ajutorul spirometrelor, spirografelor și pneumatografelor. În timp ce spirometrele și spirografele umede sau uscate permit determinarea și înregistrarea volumelor de aer ventilate într-un spațiu închis, izolat de aerul din exterior, pneumatografele sunt sisteme deschise, care permit înregistrarea continuă a volumelor ventilate grație unui traductor diferențial (rezistor) plasat în apropierea piesei bucale.

Metoda spirografică este metoda folosită curent pentru determinarea capacității vitale și a volumelor care o compun. Ea pune în evidență fracțiile de aer ventilate în funcție de amplitudinea inspirului și a expirului (fig. 8.19).

Metoda pneumatografică permite înregistrarea sau afișarea digitalică a debitelor instantanee și integrate, raportate la valorile de referință și exprimate în procente.

Metoda pletismografică realizează determinarea volumului gazos toracic cu ajutorul pletismografului corporal (*body test*).

Subiectul respiră aer din cabina etanșă printr-o piesă bucală prevăzută cu un dispozitiv care poate întrerupe comunicarea cu cabina. După echilibrarea presiunii din pletismograf cu aerul atmosferic, prin intermediul unei supape din pereții cabinei ce suprimă comunicarea piesei bucale cu aerul din cabină, se cere subiectului să efectueze o inspirație urmată de expirație rapidă, pentru a realiza comprimarea și decompresia aerului din plămâni. Variațiile de volum ale cavității toracice preluate de variațiile de presiune din cabina pletismografului din timpul unui ciclu respirator permit calculul volumului de gaz existent în torace (VGT), care este egal cu acela al capacității reziduale funcționale (CRF).

Metoda diluției gazelor inerte (heliu sau azot) apreciază volumele pulmonare în funcție de concentrația acestora în aerul expirat. Determinările pot fi făcute în sistem închis sau deschis, prin tehnica respirației unice sau multiple.

Volumul pulmonar total poate fi apreciat și radiologic, pe radiografiile toraco-pulmonare efectuate în apnee, după o prealabilă inspirație maximă.

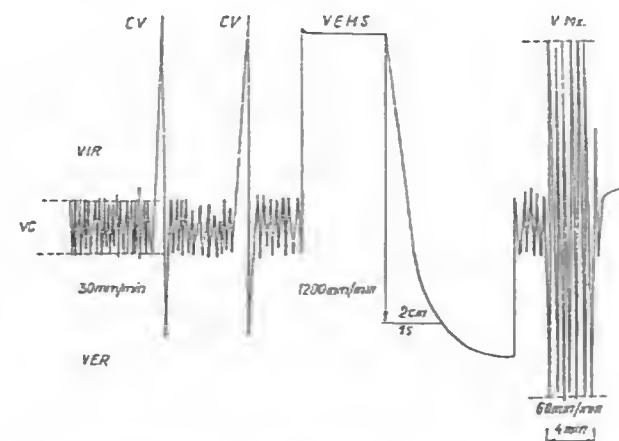


Fig. 8.20. Înregistrarea capacității vitale și a volumului expirator maxim pe secundă.

8.4.2. VOLUME ȘI CAPACITĂȚI RESPIRATORII

În timpul unui ciclu respirator liniștit, examenul spirografic pune în evidență pătrunderea în plămâni a unui volum de aproximativ 500 ml aer, urmată de eliminarea aceluiași volum în expir. Acesta poartă numele de aer curent sau volum respirator curent.

Volumul curent (VC) este fracția de aer ventilată în condiții de repaus, cu participarea exclusivă a mușchilor inspiratori. Deplasarea acestui volum de aer presupune trecerea sistemului toraco-pulmonar din poziția expiratorie de repaus în poziția inspiratorie de repaus, cu revenire la poziția inițială. De precizat că din volumul aerului curent numai 2/3 (aproximativ 350 ml) ajung în teritoriul de schimb alveolar, restul de 1/3 (150 ml) rămâne la nivelul spațiului mort anatomic din căile respiratorii.

Printr-un inspir profund mai poate fi introdusă în plămâni o cantitate suplimentară de aer, numit aer complementar sau volum inspirator de rezervă.

Volumul inspirator de rezervă (VIR) este volumul de aer pătruns în plămâni în timpul efortului inspirator maxim. Valoarea sa normală variază în limitele a 1 500–2 000 ml aer. Împreună cu volumul curent formează capacitatea inspiratorie (CI). Aceasta reprezintă volumul de aer ce poate fi introdus în plămâni în timpul inspirului normal maxim după un expir de repaus.

Printr-un expir forțat se îndepărtează din plămâni o nouă fracție de aer, în afara celei de repaus. Aceasta reprezintă aerul de rezervă, sau volumul expirator de rezervă.

Volumul expirator de rezervă (VER) este fracția de aer expulzată din plămâni în momentul trecerii de la poziția expiratorie de repaus la un expir maxim și are valoare normală medie de 1 200 ml.

Însumarea celor trei fracții astfel ventilate reprezintă capacitatea vitală.

Capacitatea vitală (CV) este volumul maxim de aer ce poate fi ventilat prin plămâni în timpul unei respirații de maximă amplitudine, respectiv după un inspir profund urmat de un expir forțat (fig. 8.20). Valoarea medie a capacității vitale normale este de 3 500–3 800 ml, cu variații importante în funcție de vârstă, sex, efort, stări patologice etc. Pentru a obține valoarea reală a capacității vitale este necesară corecția BTPS, în funcție de temperatură, presiune și saturație cu vapori de apă. Când capacitatea vitală nu

poate fi determinată spirometric sau gazometric, se recurge la calculul teoretic al acesteia, în funcție de talie, vârstă și greutate.

Volumul de aer care rămâne în plămâni după o expirație forțată se numește **volum rezidual (VR)**. El este introdus în plămâni la naștere, odată cu prima respirație. Găsindu-se la nivelul zonei de schimb gazos alveolar, îndeplinește rol tampon între fracțiile ventilate și teritoriul alveolo-capilar. Prezența sa în cantitate de 1 200–1 300 ml în sectorul alveolar poate fi pusă în evidență cu ajutorul heliului. VR împiedică variațiile bruște ale concentrației și presiunilor parțiale ale O_2 și CO_2 , asigurând caracterul continuu al schimburilor gazoase alveolo-capilare.

Împreună cu aerul de rezervă (VER), volumul rezidual formează aerul alveolar total sau **capacitatea reziduală funcțională (CRF)**, cu valoarea medie de 2 500–2 800 ml.

Suma celor 4 fracții de aer ventilate în teritoriul pulmonar ($VC + V_{IR} + VER + VR$) constituie **capacitatea pulmonară totală (CPT)**. Volumul acesteia variază între 4 800–5 000 ml aer.

Coefficientul de ventilație este de 10–12%. Valoarea lui se află împărțind cele 2/3 ale volumului curent (350 ml) la capacitatea vitală (3 500–3 800 ml). Cu fiecare respirație se înnoiește a 7-a parte din aerul alveolar total, care nu este altceva decât capacitatea reziduală funcțională.

Raportarea volumelor ventilate la unitatea de timp permite determinarea debitelor respiratorii.

Debitul respirator (DR) este produsul dintre volumul curent (500 ml) și frecvența respirațiilor pe minut (14–16 respirații). Denumit și debit ventilator, are o valoare medie de 6–8 litri pe minut în condiții de repaus la adult. În funcție de intensitatea și durata efortului, debitul respirator poate crește până la 30–40 l/min sau chiar mai mult.

Debitul ventilator maxim (DVM) poate atinge însă valori mult mai mari, de 120–130 l/min. Valoarea sa se calculează în funcție de volumul de aer ventilat cu frecvență și amplitudine maximă timp de 10–15 secunde, raportat la 1 minut, pentru a se evita tulburările produse de alcaloză.

Volumul expirator maxim pe secundă (VEMS) se obține în timpul unui expir forțat maxim, după un inspir profund (vezi fig. 8.20). Volumul de aer expirat în prima secundă reprezintă aproximativ 70–80% din valoarea capacității vitale, respectiv 2 800–3 000 ml. Depinzând de capacitatea vitală, forța musculară și permeabilitatea căilor respiratorii, VEMS oferă indicații utile asupra funcției ventilatorii pulmonare.

Raportul dintre VEMS și CV poartă numele de indice Tiffeneau, sau indice de permeabilitate bronșică, cu valoare subunitară de 0,7–0,8.

Determinarea acestor volume și debite ventilatorii oferă indicații valoroase asupra randamentului respirator și a eventualelor tulburări de ventilație. Referitor la randamentul respirator, primenirea întregii cantități de aer alveolar se realizează în condiții normale în aproximativ 1 minut (mai exact $1/2$ în 23 s). În tulburările ventilatorii de tip obstructiv (astm bronșic, de exemplu), scad CV și indicele Tiffeneau, în timp ce VR crește peste 35%. În tulburările de tip restrictiv (fibroze pulmonare) scad atât CV, cât și VR. În afara disfuncțiilor ventilatorii de tip obstructiv, restrictiv sau mixt, variații ale volumelor și debitelor ventilatorii apar în funcție de vârstă, de starea de veghe-somn, repaus-activitate, temperatură, presiune barometrică etc.

8.5. SCHIMBURI GAZOASE LA NIVEL ALVEOLO-CAPILAR

Schimburile gazoase la nivelul alveolo-capilar sunt supuse legilor fizice ale difuziunii și favorizate de particularitățile membranei alveolo-capilare (suprafață mare,

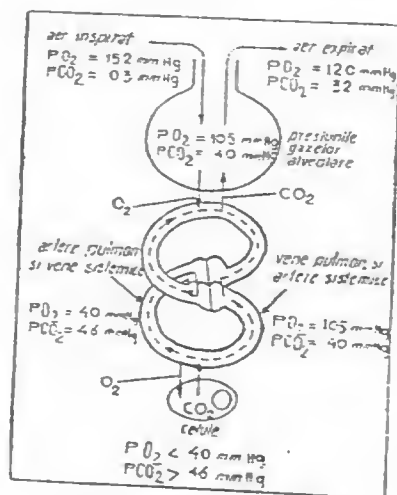


Fig. 8.21. Schimburile gazoase la nivel pulmonar și tisular.

grosime mică – sub $1 \mu m$, peliculă lichidiană fină). Difuziunea asigură deplasarea gazelor respiratorii (O_2 și CO_2) din teritoriul cu concentrație și presiune mai mari spre cel mai mic. Intensitatea difuziunii depinde de gradientul de concentrație, de presiunea parțială și de coeficientul de solubilitate și difuziune al gazului respectiv (fig. 8.21).

Legile fizice care guvernează transferul de gaze la nivel alveolo-capilar sunt următoarele:

– **Legea Dalton**, denumită și legea presiunilor parțiale, este legea conform căreia presiunea unui gaz într-un amestec gazos este direct proporțională cu conținutul său procentual în amestec.

Presiunea gazului din amestec, denumită și **presiune parțială**, este presiunea exercitată de gazul respectiv ca și cum acesta ar ocupa singur volumul amestecului.

Presiunea parțială a unui amestec de gaze, cum este aerul atmosferic ventilat la nivelul căilor aeriene, este egală cu suma presiunilor parțiale ale gazelor din amestec.

Fiind proporțională cu volumul procentual al gazului din amestec, presiunea parțială a acestuia se calculează înmulțind presiunea totală (barică) a amestecului (760 mmHg – 40 mmHg, presiunea vaporilor de apă) cu concentrația procentuală a gazului respectiv. Astfel, în cazul oxigenului atmosferic, presiunea parțială va fi:

$$720 \times \frac{20.97}{100} = 156 - 158 \text{ mmHg}$$

În cazul CO_2 atmosferic:

$$720 \times \frac{0.03}{100} = 0,3 \text{ mmHg}$$

În cazul azotului:

$$720 \times \frac{79}{100} = 596 \text{ mmHg}$$

În funcție de concentrația procentuală se calculează presiunea parțială a gazelor respective din aerul alveolar, aerul expirat și sânge.

Valorile obținute sunt prezentate în tabelul 8.II.

TABELUL 8.II

Presiunile parțiale ale gazelor respiratorii în aer și sânge

Presiunea la barometru 760 mmHg	Presiunea parțială				
	Aer inspirat (mmHg)	Aer expirat (mmHg)	Aer alveolar (mmHg)	Sânge venos (mmHg)	Sânge arterial (mmHg)
Oxygen	158,25	116	100	37	95–100
Bioxid de carbon	0,30	28	40	46	40
Azot	596,45	569	573	573	573
Vapori de apă	5,00	47	47	47	47
Total	760,00	760	760	703	760

– **Legea Boyle-Mariotte**: presiunea unui gaz la aceeași temperatură este invers proporțională cu volumul.

– **Legea Gay-Lussac**: volumul unui gaz crește cu temperatura dacă presiunea rămâne constantă.

– **Legea lui Henry**: cantitatea de gaz dizolvată într-un lichid la temperatură constantă este proporțională cu presiunea parțială a acestuia în faza gazoasă.

Influențele exercitate de legile fizice asupra volumelor și presiunilor parțiale ale celor două gaze respiratorii din aerul alveolar realizează transferul continuu și tendința la echilibrare a acestora în cele două compartimente ale teritoriului alveolo-capilar. Intensitatea proceselor fizice de transfer gazos la nivelul al-

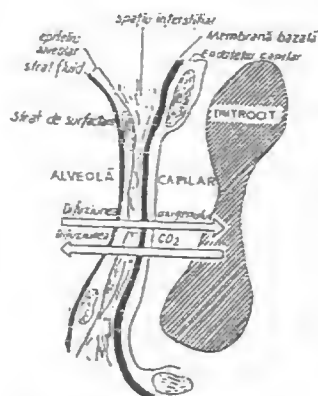


Fig. 8.22. Difuziunea gazelor la nivel alveolo-capilar.

veolo-capilar depinde de suprafața teritoriului de schimb alveolo-capilar, de diametrul barierei aer-sânge și de pelicula lichidiană fină de la nivelul suprafeței alveolare (fig. 8.22).

Denumirea de membrană alveolo-capilară cuprinde structurile care separă aerul alveolar de sângele din capilarele pulmonare și constituie sediul principal al proceselor de respirație pulmonară.

De o parte și de alta a membranei alveolo-capilare, concentrația gazelor este diferită și mișcarea lor prin membrană se face prin difuziune, cu tendința echilibrării lor în cele două compartimente. Transferul se realizează continuu, datorită aportului neîntrerupt la nivelul suprafeței de schimb a aerului, cu concentrație crescută în O_2 , și a sângelui capilar pulmonar, cu exces de CO_2 . Modalitățile de transfer sunt diferite pentru gazele inerte (N_2 , eter, gaz anestezic, N_2O , heliu), care se dizolvă în sânge fără a se combina chimic, față de O_2 , CO_2 , NO , care se combină cu diferiți constituenți sanguini, în primul rând cu hemoglobina (fig. 8.23).

8.5.1. FACTORI CARE INFLUENȚEAZĂ TRANSFERUL ALVEOLO-CAPILAR

Desfășurarea normală a procesului de transfer este condiționată de mai mulți factori, printre care:

- gradientul de presiune parțială a gazelor respiratorii de o parte și de alta a membranei separatoare;
- proprietățile fizico-chimice ale gazului care străbate membrana;
- calitățile membranei.

Transferul prin membrană presupune un proces de difuziune, datorită unui gradient de concentrație, urmat de difuziunea și fixarea în sângele capilarelor pulmonare.

Deși suprafața membranei de separare este foarte mare ($70-100 m^2$), grosimea sa redusă ($0,2-1 \mu m$) face ca, pe ansamblul plămânului, ea să reprezinte un volum mic (aproximativ 80 ml).

Capacitatea de difuziune pulmonară (DP) pentru un gaz „X” este volumul de gaz transferat pe minut în sânge (V_x) în condițiile existenței unei diferențe de presiune parțială alveolo-capilară de 1 mmHg:

$$DP_x = \frac{\dot{V}_x}{P_{Ax} - P_{Cx}}$$

unde $P_{Ax} - P_{Cx}$ este diferența de presiune alveolo-capilară medie care asigură transferul de gaz.

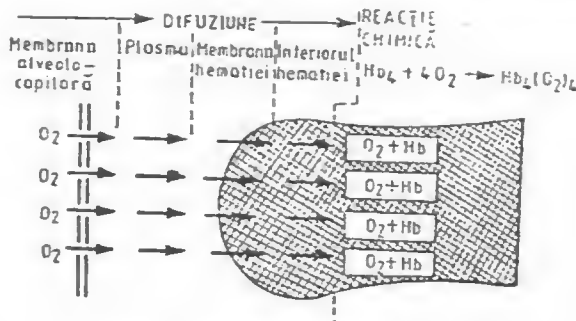


Fig. 8.23. Difuziunea și fixarea O_2 pe hemoglobină.

Rezistența pulmonară la procesul de difuziune poate fi astfel exprimată ca inversul capacității de difuziune:

$$RP_x = \frac{P_{Ax} - P_{Cx}}{\dot{V}_x} = \frac{1}{DP_x}$$

și presupune două componente: rezistența membranei (RM) și rezistența sângelui reprezentată de eritrocite (RE). Capacitatea de difuziune pulmonară reprezintă inversul acestor rezistențe.

Deci, $RP = RM + RE$; dar $RP = \frac{1}{DP}$, ceea ce presupune:

$$\frac{1}{DP} = \frac{1}{DM} + \frac{1}{DE}$$

Capacitatea membranei de transfer (DM) poate fi definită ca volumul V al unui gaz cu solubilitatea α și coeficientul de difuziune D' , transferat pe minut printr-o membrană de suprafață S și grosime x pentru o diferență de presiune alveolo-capilară de 1 mmHg.

Datorită grosimii foarte reduse a membranei alveolo-capilare se poate aplica următoarea ecuație de difuziune:

$$DM = \frac{\alpha \cdot D' \cdot S}{760 \cdot x}; \text{ dar } D' = K \cdot \sqrt{GM}$$

dec:

$$DM = \frac{K}{760} \cdot \frac{\alpha}{\sqrt{GM}} \cdot \frac{S}{x}$$

Capacitatea de difuziune a membranei este - așa cum exprimă ecuația - invers proporțională cu grosimea membranei și cu rădăcina pătrată din greutatea moleculară a gazului (GM) și direct proporțională cu suprafața și cu coeficientul de solubilitate al gazului.

Capacitatea de transfer a eritrocitelor (DE) traduce volumul de gaz fixat pe minut (V) de către eritrocitele din capilarele pulmonare la diferența de presiune parțială de 1 mmHg între plasmă și centrul eritrocitului.

Fixarea globulară este în funcție de circulația care se desfășoară la nivelul patului vascular pulmonar. Astfel, fixarea este redusă atunci când combinarea chimică se face lent sau viteza de circulație este mare și, dimpotrivă, fixarea poate fi favorizată de o circulație lentă și o capacitate de combinare mare.

Capacitatea de difuziune eritrocitară a O_2 , CO și CO_2 se deosebește de cea a gazelor inerte prin două puncte esențiale: cantitatea de gaz transferată este proporțional mai mare decât a majorității gazelor inerte deoarece este dependentă de solubilitate, care este mai crescută; este mai întârziată datorită reacțiilor chimice care sunt cu atât mai lente, cu cât sângele nu este saturat la începutul patului capilar, în cazul în care gradientul presiunal alveolo-capilar nu este accentuat. Volumul de O_2 sau de CO_2 fixat pe eritrocite depinde în final de mai mulți factori, și anume: concentrația în Hb a sângelui, presiunea alveolară a gazului, afinitatea gazului pentru Hb din sânge, viteza de combinare chimică în raport cu viteza de circulație a sângelui în teritoriul interesat.

Capacitatea de transport circulator: prin analogie cu capacitatea de transfer pulmonar se poate defini și capacitatea de transport circulator (TC), care se traduce prin volumul de gaz ce va putea fi transferat într-un minut de la nivelul plămânului la țesuturile periferice prin intermediul circulației sistemice, în condițiile creșterii cu 1 mmHg a presiunii parțiale între sângele venos amestecat și sângele capilar terminal.

Proprietățile fizico-chimice ale gazelor respiratorii. Proprietățile fizico-chimice ale gazelor respiratorii influențează comportamentul lor la nivelul barierei alveolo-capilare. În cazul unui gaz (sau al unui amestec gazos), separat sau nu printr-o membrană de o fază lichidă, există tendința de egalizare a tensiunilor gazului în ambele compartimente. La temperatură și presiune considerate standard, cantitatea de gaz care poate să

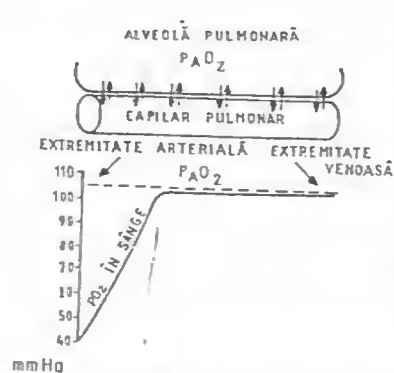


Fig. 8.24. Absorbția O_2 din capilarele pulmonare pe baza gradientelor de presiune parțială (după Milhorn și Pulley, 1968).

faza lichidă a membranei (coeficient Bunsen).

La temperatura de $37^\circ C$ și presiunea de 1 atm, solubilitatea în mediul gazos este de 0,0239 ml gaz/ml lichid pentru O_2 și de 0,567 ml gaz/ml lichid pentru CO_2 , rata de difuziune a O_2 fiind deci de 20 de ori mai mică decât a CO_2 , iar diferitele circumstanțe patologice o afectează precoce și sever.

8.5.2. TRANSFERUL GAZELOR RESPIRATORII PRIN MEMBRANA ALVEOLO-CAPILARĂ

Diferența de presiune parțială care se menține între sectorul alveolar și cel al capilarelor pulmonare impune transferul permanent de O_2 spre capilarul pulmonar și de CO_2 în sens invers (fig. 8.24).

8.5.2.1. Transferul oxigenului

Consecința ventilației alveolare este aportul permanent de O_2 la nivelul sectorului de schimb care să înlocuiască pe cel difuzat prin membrană. Datorită prezenței spațiului mort, concentrația și, deci, presiunea sa parțială se mențin tot timpul în limite constante de aproximativ 16 ml%, respectiv 100 mmHg pentru O_2 . Difuziunea O_2 este mai mare din aerul alveolar spre sângele din capilarele pulmonare.

Înregistrarea grafică a comportamentului presional al O_2 la nivelul capilarului pulmonar (P_{aO_2}) arată o creștere progresivă a P_{aO_2} pe tot parcursul traversării capilarului și faptul că saturarea sângelui capilar în O_2 se face într-un timp scurt, la începutul traseului capilarului. Rezultă că diferența de presiune care favorizează difuziunea este maximă numai în momentul contactului inițial sânge/aer și că această diferență de presiune scade imediat. Există, deci, o presiune medie care guvernează difuziunea. Această presiune medie nu reprezintă media aritmetică dintre cele două extremități presionale, ci este o valoare care rezultă din integrarea matematică a suprafeței cuprinse între ordonată și curba presională a O_2 , egală cu 11 mmHg.

Importanța fiziologică a acestui comportament apare mai ales în cursul efortului, când creșterea frecvenței cardiace și respiratorii scurtează timpul de contact dintre aer și sânge. Realizarea unei oxigenări eficiente este favorizată și de creșterea capacității de difuziune a O_2 de aproape trei ori în timpul exercițiului muscular (până la 65 ml/minut). Aceasta se realizează prin deschiderea unui mare număr de capilare

și absorbită de către 1 ml de lichid definește *coeficientul de absorbție* a gazului în lichid. Valoarea acestei constante scade dacă în apă sunt dizolvate și alte substanțe și variația sa este invers proporțională cu variația temperaturii lichidului. Astfel, *coeficientul de solubilitate* este de 0,049 pentru O_2 și 1,71 pentru CO_2 în apă, la $37^\circ C$ și devine 0,024 pentru O_2 și 0,51 pentru CO_2 în plasmă, la temperatura de $37^\circ C$.

Viteza de difuziune a unui gaz într-un lichid este exprimată prin *coeficientul de difuziune*.

Coeficientul de difuziune poate fi definit prin numărul de cm^3 de gaz care difuzează într-un minut, la o presiune de 1 atm, parcurgând o distanță de 0,001 mm pe o suprafață de $1 cm^2$. Valoarea acestui parametru este direct proporțională cu coeficientul de absorbție a gazului și invers proporțională cu rădăcina pătrată a greutatei sale moleculare, crește cu 1% pentru fiecare grad de temperatură și prezintă variații pentru diferite țesuturi.

Traseul gazelor respiratorii din alveolă până la hematie implică parcurgerea unor faze lichide, în cursul cărora gazul suportă un proces reversibil de solvare. De aceea, rata de transfer depinde și de coeficientul de solubilitate a gazului în

pulmonare, dilatarea tuturor capilarelor și alveolelor, care are ca urmare diminuarea grosimii membranei alveolare.

Concordanța dintre ventilație și perfuzie asigură o eficiență maximă procesului de transfer. Oxigenul este permanent absorbit în sângele capilar pulmonar și pătrunde permanent din aerul atmosferic la nivel alveolar (fig. 8.25).

Cu cât absorbția de O_2 este mai rapidă, cu atât devine mai scăzută concentrația sa în alveole. Dimpotrivă, cu cât pătrunderea de O_2 proaspăt este mai rapidă la nivelul alveolei, cu atât concentrația sa este mai mare. Ca urmare, concentrația O_2 la nivel alveolar este reglată prin viteza cu care este absorbit la nivelul sângelui (din capilarele pulmonare), dar și de viteza cu care O_2 proaspăt pătrunde în plămân prin procesul de ventilație.

Capacitatea de difuziune a O_2 . S-a constatat că la un adult capacitatea de difuziune a O_2 este, în condiții de repaus, de 21 ml/minut. Dacă diferența medie de presiune parțială a O_2 la transferul prin membrana alveolo-capilară este – așa cum s-a arătat anterior – de 11 mmHg la o respirație de repaus, rezultă că într-un minut difuzează prin membrana respiratorie aproximativ 230 ml O_2 .

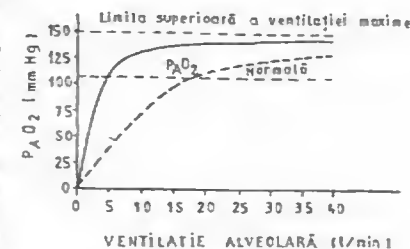


Fig. 8.25. Efectul ventilației alveolare și al vitezei de difuziune a O_2 spre alveole asupra P_{aO_2} (presiune parțială a O_2 în alveolă).

8.5.2.2. Transferul bioxidului de carbon

CO_2 care se formează continuu la nivel celular este adus la nivelul sectorului de schimb gazos alveolar prin circulația pulmonară, fiind eliminat permanent la exterior prin procesul de ventilație. În consecință, presiunea parțială a CO_2 la nivel alveolar (P_{aCO_2}) este condiționată, pe de o parte, de viteza de eliminare a CO_2 din sânge în alveolă și, pe de altă parte, de viteza cu care acesta este expulzat prin ventilație din alveole spre exterior (fig. 8.26).

Înregistrarea grafică a comportamentului presiunii CO_2 la nivel alveolar (P_{aCO_2}) în funcție de viteza de difuziune a CO_2 și de ventilație arată că eliminarea CO_2 în condiții normale este de 200 ml/min, valoarea la care, pentru a se menține o P_{aCO_2} constantă, este necesară o ventilație de aproximativ 4,2 l/min.

Transferul prin membrană este guvernat de diferența de presiune parțială a gazului în cele două sectoare de schimb și facilitat de solubilitatea și capacitatea sa mare de difuziune (fig. 8.27).

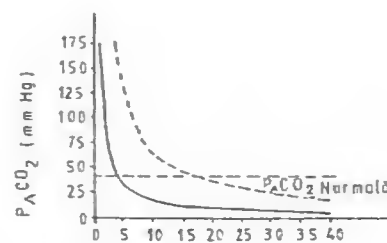


Fig. 8.26. Efectul ventilației alveolare și al vitezei de difuziune a CO_2 spre alveolă asupra P_{aCO_2} (presiune parțială a CO_2 în alveolă).

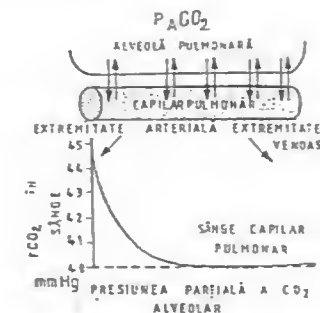


Fig. 8.27. Trecerea CO_2 din capilare spre alveole pe baza diferențelor de presiune parțială.

Sângele din capilarele pulmonare are o presiune parțială a CO_2 (P_{vCO_2}) de 45–46 mmHg, în timp ce în alveole presiunea sa parțială ($P_{\text{A CO}_2}$) este de numai 40 mmHg. Diferența de presiune inițială, în primul moment al contactului aer/sânge, este de 5 mmHg.

Deși diferența de presiune parțială este mai mică decât cea care se stabilește inițial în cazul O_2 , difuziunea CO_2 se poate realiza eficient prin intervenția celorlalți factori favorizanți (difuziune și solubilitate mare). Astfel, chiar în primele momente ale timpului de tranzit, se ajunge aproape la egalizarea presiunilor în cele două compartimente.

Capacitatea de difuziune a CO_2 este de aproximativ 17 ml/min, deci de 1,23 de ori mai mică comparativ cu a O_2 . Rezultă că, în condiții de repaus, membrana alveolo-capilară poate transfera 400–500 ml/min, iar în condițiile unui exercițiu muscular cantitatea poate ajunge până la 1 200–1 300 ml/min. În cazul unor procese patologice care interesează și membrana respiratorie, difuziunea CO_2 este afectată mai târziu comparativ cu a O_2 .

8.5.2.3. Difuziunea gazelor inerte

Volumul de gaze inerte transferate depinde de solubilitatea lor și de debitul sanguin. Capacitatea de difuziune membranară a acestor gaze este de 100 până la 2 000 de ori mai mare decât capacitatea lor de transport circulator. Viteza lor de transfer este foarte mare și echilibrarea presiunilor de la nivel capilar și alveolar se face foarte rapid, favorizată fiind de suprafața mare și grosimea redusă a membranei alveolo-capilare, dar și datorită volumului de sânge mic din capilarele pulmonare.

Când un volum mic de sânge ajunge la capilare, gazele inerte alveolare îl saurează aproape instantaneu și difuziunea continuă în acest volum de sânge pe tot parcursul capilarului.

Difuziunea se reia, la intrarea în rețea, în momentul când sângele saturat este înlocuit cu sânge arterial pulmonar. Debitul de gaz transferat spre țesuturi este, deci, limitat prin viteza de reîmprospătare a sângelui, adică prin debitul capilar. Din acest motiv, gazele solubile, acetilena și N_2O sunt utilizate pentru măsurarea debitului cardiac. Principiul metodei constă în măsurarea cantității de gaze inerte solubile dispărute din alveole după 10–15 s de apnee.

Capacitatea de difuziune a gazelor inerte este foarte mare, volumul transferat depinzând de solubilitatea gazului și de debitul sanguin în sectorul de schimb și având un caracter exponențial (fig. 8.28).

Volumul de gaz (V) care părăsește alveola într-un anumit interval de timp (dt) este egal cu volumul adus prin circulația capilară pulmonară în același interval de timp:

$$V = (DM/60) \cdot (P_A - P_c) \cdot dt$$

unde $P_A - P_c$ este diferența arteriolo-capilară, iar $DM/60$ exprimă difuziunea membranară în unitatea de timp.

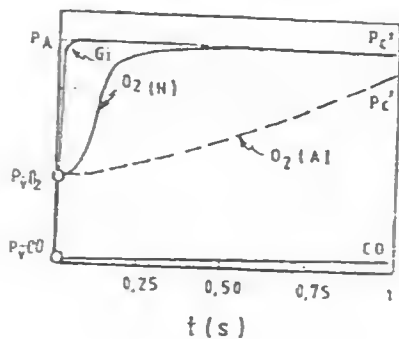


Fig. 8.28. Cinetica transferului pulmonar al gazelor inerte. G_i , echilibrarea instantanee a gazelor inerte. P_A , presiunea parțială la nivel alveolar. P_c , presiunea parțială atinsă la nivelul capilarelor pulmonare după transferul prin membrana capilară. $\text{O}_2(\text{N})$, curba de echilibrare a O_2 care se obține la plămânul normal în 0,3 s. $\text{O}_2(\text{A})$, curba de echilibrare a O_2 în caz de hipoxie alveolară. P_{vCO_2} , presiunea parțială a O_2 în capilarele arteriale pulmonare. P_{vCO_2} , presiunea parțială a CO în sângele venos capilar.

S-a constatat că azotul (N), deși este inert din punct de vedere respirator, totuși, o cantitate constantă de 0,83 vol% este absorbită și dizolvată în plasmă. În organism, această cantitate nu este însă produsă și nici folosită. În aerul alveolar și expirat procentul acestui gaz este mai mare decât aerul inspirat. Creșterea nu este reală, ea datorându-se scăderii volumului total al gazelor respiratorii; cantitatea de O_2 absorbită este mai mare decât cantitatea de CO_2 eliminată (coeficient respirator 0,8).

8.5.2.4. Transferul apei și al diferitelor soluții prin membrana alveolo-capilară

Prin studii morfometrice și cinetice ale diluției de trăsori în diferite spații de distribuție, s-a arătat că volumul sectoarelor vasculare interstițiale și celulare în plămân nu sunt diferite de cele din restul organismului.

Plămânul normal conține 80% apă și 20% reziduu uscat. În cursul edemului pulmonar, proporția de apă poate să atingă 85–90%. După exsanguinare, celulele pulmonare ocupă 60% din volum, iar interstițiul 40%.

Țesutul parenchimos alveolizat și irigat prin arterele pulmonare reprezintă 80% din volumul pulmonar și 20% corespunde septurilor fibroase și pereților bronșici, irigați prin arterele bronșice. În țesutul interstițial, apă liberă este puțin mobilă, fiind localizată în cavitățile gelului care constituie substanța fundamentală.

Presiunea lichidului interstițial, ușor negativă în țesuturile periferice, este net negativă la nivelul plămânului.

Măsurătorile directe, cu ajutorul unor capsule încorporate, arată valori de $(-5) - (-20) \text{ cmH}_2\text{O}$, cu tendință la creștere spre baza plămânului. Presiunea coloidosmotică exercitată de către macromoleculele din interstițiu și procentajul apei libere din acest sector nu au putut fi determinate cu precizie. De asemenea, nu se cunoaște cu certitudine concentrația proteinelor în interstițiu; fiind echivalată cu valoarea acestora din limfa pulmonară, este de aproximativ 2/3 din concentrația proteinelor plasmatică. Se poate, deci, aprecia presiunea coloidosmotică interstițială între 5–15 cmH_2O .

Mișcările apei și soluțiilor se face prin două mecanisme diferite:

- 1) convecția – transportul de masă, activ, orientat și rapid, de-a lungul unui gradient de presiune, a cărui valoare este egală cu pătratul suprafeței de schimb;
- 2) difuziunea – transport pasiv, lent, legat de agitația termică moleculară, orientat în lungul unui gradient de concentrație și proporțional cu suprafața de schimb.

Forțele implicate în aceste procese de transfer sunt:

- diferențele de presiune hidrostatică, care creează debite convective de apă și de soluții și
- diferențele de concentrații, care creează gradient de presiune osmotică și antrenează simultan un debit difuzional lent de soluții și un debit convectiv rapid de solvenți în direcții opuse celor precedente.

Se pare că:

- a) nu există diferențe între presiunea hidrostatică și cea coloidosmotică. Astfel, debitele de lichid create prin gradient de presiune osmotică sunt, ca și debitele create prin gradient de presiune hidrostatică, debite convective, și nu difuzionale (fig. 8.29).

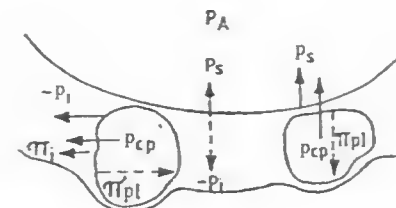


Fig. 8.29. Presiunile care influențează transferul de fluide între capilare, interstițiu și alveole. P, presiune hidrostatică. π , presiune coloidosmotică. A, alveolă. pl, plasmă. cp, capilar. i, interstițiu. Ps, presiune dezvoltată de către forțele de suprafață ale filmului endoalveolar.

Prin analogia dintre cinetica moleculară a gazelor și soluțiilor, se sugerează că moleculele din soluții bombardează suprafețele sau membranele, creând o presiune pozitivă soluției și o presiune negativă soluției, care atrage hidrodinamica fluidului situat de cealaltă parte a membranelor;

b) legea Van t'Hoff, referitoare la concentrațiile și presiunea osmotică în soluțiile micromoleculare diluate, nu se aplică pentru soluții macromoleculare, cum sunt plasma și lichidul interstițial, deoarece, în soluțiile macromoleculare relativ concentrate, presiunea colloidosmotică depinde mai mult de concentrația masică decât de concentrația moleculară.

Acest comportament particular al macromoleculelor se întâlnește în cazul când acestea nu formează soluții adevărate, ci se comportă mai curând ca geluri hidratate în prezența apei, reducând proporția apei libere și concentrând soluțiile. Astfel, 1 g de albumină este capabil să fixeze 1/3 g apă, iar dispersiile coloidale sunt capabile să atragă apa soluțiilor electrolitice cu concentrație moleculară de sute de ori mai mare decât ele.

Macromoleculele sunt, de asemenea, capabile să dizolve ioni în soluții și să coboare presiunea osmotică dezvoltată efectiv de o soluție electrolitică. Din aceste considerente, este dificil să se calculeze fără risc de eroare presiunea colloidosmotică exercitată de către plasmă;

c) valorile presiunii colloidosmotice obținute prin măsurători directe se raportează la presiunea exercitată asupra unei membrane semipermeabile ideale, permeabilă la apă și impermeabilă la soluții, fără a le lăsa să treacă.

Membranele biologice nu sunt membrane semipermeabile perfecte. Întrucât ele lasă să treacă o parte din macromolecule, cu greutate moleculară mică.

Diferențele de presiune hidrostatică și de concentrație, de o parte și de alta a peretelui capilarului pulmonar, sau la originea a două fenomene diferite de transfer:

- filtrarea – proces de transfer convectiv net de lichid și soluții, puțin important;
- difuziunea – proces de schimb bidirecțional de apă și soluții.

Filtrarea transcapilară. La starea de echilibru, fluxul net de apă și de soluții care traversează peretele vaselor pulmonare prin filtrare este minim (mai mic de 0,1% din debitul plasmatic pulmonar și câteva mg de proteine pe minut).

Apă și proteinele filtrate la capătul arterial al vaselor alveolare sunt reuate, în parte, la nivelul capătului venos și, în parte, de limfatice, al căror debit foarte scăzut este de ordinul 0,5 l/zi.

În timpul edemului pulmonar, prin supraîncărcare lichidiană sau din cardiopatiile stângi, debitul limfatic poate, pentru o scurtă perioadă de timp, să crească de 5 – 10 ori fără să limiteze formarea edemului.

Edemul pulmonar este o acumulare de lichid de origine plasmatică în plămân, la nivelul interstițiului sau în alveole.

Circumstanțele patogenetice le deosebesc în edeme lezionale și hemodinamice.

Edemele lezionale se datoresc distrugerii peretelui alveolo-capilar, cel mai frecvent de cauză virală sau toxică. În aceste situații are loc o trecere directă spre alveole a plasmă bogate în proteine, în special în fibrină, fără variații ale presiunii capilare.

Edemele hemodinamice se produc prin exagerarea proceselor fiziologice normale de filtrare a plasmăi. Ele pot să apară prin:

a) creșterea presiunii hidrostatice capilare; ultrastructura membranei alveolo-capilare nu este modificată, diametrul joncțiunilor intercelulare rămâne neschimbat, iar lichidul de edem filtrat este sărac în proteine și nu conține fibrină;

b) scăderea presiunii colloidosmotice a plasmăi și

c) prin scăderea presiunii lichidului interstițial (de exemplu, după evacuarea rapidă a revărsatelor pleurale).

Procesul de filtrare spre alveole este limitat atât de dimensiunile reduse ale joncțiunilor dintre celulele epiteliale, cât și de echilibrul presiunilor dintre alveole, interstițiu și capilare.

Lichidul filtrat invadează alveolele doar atunci când presiunea capilară crește peste 25–30 mmHg și când posibilitățile de drenaj limfatic mediastinal sunt depășite. Totodată, are loc și o colabare a alveolelor, deoarece, prin comprimarea surfactantului, raza de curbura a interfeței aer/lichid scade și se accentuează depresiunea realizată prin forțele de suprafață.

Proportional cu acumulările de lichid crește și greutatea plămânului. Astfel, edemul din stadiul inițial sporește greutatea organului cu 5–8%, pentru ca, la momentul apariției invaziei alveolare, greutatea să crească cu 35%, iar acumularea de lichid în regiunile bazale să fie urmată de creșteri cu 60%.

Transferul de lichid în plămân poate fi apreciat prin măsurarea spațiului de difuziune al apei extravasculare (SDAE) printr-o dublă diluție de trăsori.

Principiul metodei constă în injectarea la intrarea în circulația pulmonară a unui trăsor vascular legat de o proteină sau de hematii și al unui trăsor care poate difuza foarte rapid în spațiul de distribuție al apei (de exemplu, ¹²⁵I-iodantipirină), urmată de compararea cu un eșantion de sânge arterial periferic. Analiza curbelor de concentrație a trasorilor în funcție de timp, în sângele arterial, permite calcularea debitului cardiac și a timpului mediu de tranzit al celor doi trăsori. Timpul mediu de tranzit este direct proporțional cu volumele în care se găsesc distribuții trasorii.

Schimburi prin difuziune. În condițiile obișnuite, transferul de apă și soluții prin filtrare este redus; un loc mai important îl ocupă în economia plămânului schimburile bidirecționale, prin difuziune, între sectoarele intra- și extravascular. Schimburile dinspre alveolă spre capilare sunt mai puțin importante în condiții normale, ele se manifestă evident când alveolele sunt pline cu lichid de transsudat sau, în toxicologie și farmacologie, pentru aprecierea permeabilității epitelului alveolar la diferite molecule.

Permeabilitatea membranei pentru diferite soluții micromoleculare este de 10–100 de ori mai mică față de cea a endoteliului vascular, deci rezistență la procesul de transfer opun epitelul alveolar (90%) și mai puțin endoteliul (10%).

La nivelul epitelului alveolar este posibilă totuși absorbția rapidă a unui mare număr de micromolecule (uree, manitol, sacroză), precum și antibiotice. Comparativ cu epitelul tubului digestiv, cel de la nivel alveolar are o viteză de absorbție de 10–20 de ori mai mare.

Transferul de ioni prin membrana alveolo-capilară se realizează atât prin mecanisme pasive, cât și active.

Aprecierile asupra transportului pasiv al ionilor sunt contradictorii. Se pare că acesta s-ar produce prin difuziune, la nivelul joncțiunilor celulare, asemănător cu transferul de la nivelul muscular.

Pentru transportul activ s-au efectuat studii pe plămânul de broască, urmărind fluxul unidirecțional prin tehnică de scurtcircuit. Deși există un flux unidirecțional de Na⁺, K⁺, Ca²⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻ și apă, există o mișcare a Cl⁻ și a halogenilor către alveole, ceea ce sugerează o secreție activă, precum și existența unei pompe de Cl⁻ în celulele alveolare.

Transferul de macromolecule dinspre alveole spre sânge sau limfă se face lent, tot prin vezicule de pinocitoză. Procesul se desfășoară mai rapid pentru proteinele naturale, albumină, tiroxină sau imunoglobuline, comparativ cu cele sintetice.

8.6. TRANSPORTUL SANGVIN AL GAZELOR RESPIRATORII

Pentru asigurarea proceselor de oxido-reducere celulară și menținerea echilibrului acido-bazic, circulația sanguină asigură transportul celor două gaze respiratorii.

Desfășurarea la parametri eficienți a reacțiilor de oxido-reducere necesită un aport, la nivel tisular, de 1–3 l O₂/min. din care se consumă 25–80% (coeficient de extracție a O₂ la nivel tisular).

CO₂, rezultat din reacțiile metabolice, eliberat în cantitate de aproximativ 200 ml CO₂/min (coeficient respirator 0,8), necesită o eliminare promptă, pentru menținerea echilibrului acido-bazic al organismului.

Transportul sanguin, în sensuri diferite, al celor două gaze respiratorii reclamă o serie de condiții, satisfăcute de organismul în regim normal de funcționare. Astfel, este necesară fixarea la nivelul capilarelor pulmonare a unei cantități mari de O₂ alveolar, acest fapt fiind posibil numai printr-o combinație chimică rapidă cu un transportor. Legătura cu transportorul trebuie să îngăduie o reversibilitate rapidă a reacției, pentru ca la nivel tisular să permită eliberarea ușoară a O₂. Economia organismului justifică alegerea aceluiași transportor care la nivel tisular va capta CO₂ produs, realizându-se un transport cuplat și interdependent al celor două gaze, eliberarea unuia favorizând legarea celuilalt (efecte Bohr și Haldane).

Datorită proprietăților fizico-chimice, hemoglobina constituie transportorul ideal (vezi fenomenul Hamburger direct și indirect).

8.6.1. TRANSPORTUL SANGUIN AL OXIGENULUI

Oxigenul din sânge se găsește dizolvat și combinat cu Hb, ambele forme fiind dependente de presiunea parțială a O_2 din sângele arterial (PaO_2), care are valori puțin mai scăzute față de cea din aerul alveolar (PAO_2), cu care în mod normal se echilibrează aproape perfect la subiecții tineri.

PaO_2 scade odată cu vârsta; astfel, la 20 – 40 de ani valorile sunt de aproximativ 92 mmHg, la 40–60 de ani de 84 mmHg, pentru ca după 70 de ani aceste valori să nu depășească 76 mmHg.

Dependența valorilor PaO_2 în funcție de PAO_2 se poate constata prin modificarea concentrației O_2 în aerul inspirat, urmată de măsurători ale PAO_2 .

Astfel, dacă se inspiră O_2 pur la presiunea de 1 atm în sângele arterial, PaO_2 va fi:

$$760 - (PH_2O + PCO_2) = 760 - (47 + 40) = 673$$

Limita inferioară a valorii va fi însă, datorită imperfecțiunii plămânului, de 560 mmHg.

Valorile PaO_2 sunt strict dependente de ventilație, ele putând fi interpretate numai în corelație cu $PaCO_2$. Astfel, PaO_2 normală asociată cu hipocapnie (consecutivă unei hiperventilații) are semnificația unei hipoxemii.

În sângele venos, presiunea parțială a O_2 (PvO_2) variază în funcție de organ și de intensitatea metabolismului, fiind egală cu presiunea O_2 din țesutul interstițial.

În artera pulmonară, PvO_2 (din sângele venos amestecat) este în repaus de 40 mmHg, cu valori mai scăzute în timpul efortului muscular.

8.6.1.1. Forma solubilă a O_2

Cantitativ, forma solvită a O_2 din sânge este aproape neglijabilă și depinde de PO_2 printr-o relație de liniaritate.

Sângele arterial conține numai 0,3 ml O_2 la 100 ml sânge, în condițiile unei presiuni parțiale de 100 mmHg (coeficient de solubilitate alfa).

Cantitatea de O_2 dizolvată poate să ajungă la 2 ml O_2 /100 ml sânge, dacă se respiră O_2 pur, și chiar 4–6 ml, în atmosferă hiperbară de O_2 . În aceste condiții, scăderea cantității de Hb ar putea fi suplinită, dar pentru un foarte scurt timp, datorită efectelor toxice pe care le dezvoltă presiunile crescute ale O_2 . Astfel, în condițiile unei atmosfere prea bogate în O_2 , există două riscuri: de autooxidare exotermică a moleculelor organice și de formare de radicali liberi, pentru care organismul dezvoltă mecanisme de apărare.

Autooxidarea este un fenomen care, în condiții obișnuite, este limitat de prezența unor sisteme reducătoare la nivel celular, dar se amplifică mult atunci când concentrația de O_2 crește.

Toxicitatea O_2 rezultă mai ales din capacitatea sa de a furca radicali liberi (ai unor grupe de atomi

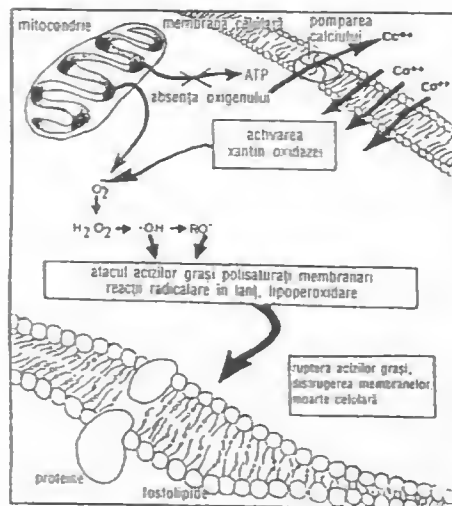


Fig. 8.30. Efectele radicalilor liberi asupra membranei celulare.

care au unul sau mai mulți electroni liberi și care schimbă proprietățile fizice și chimice ale moleculelor, transformându-le în elemente instabile, cu reactivitate foarte mare).

Radicalii liberi sunt intermediari care apar normal în cursul a numeroase reacții biochimice, dar, în condițiile atmosferei bogate în O_2 , concentrația lor crește considerabil. Toate moleculele biologice pot da naștere la radicali liberi, dar apa îi formează în mod special ($H_2O \rightarrow H\cdot, OH\cdot$). Radicalii liberi derivați din apă reacționează imediat fie între ei (formând H_2O_2), fie cu O_2 (formând radicalul $HO_2\cdot$). O_2 poate să se prezinte sub formă de superoxid de $O_2\cdot^-$. Sub această formă, el poate să reacționeze cu radicali liberi inofensivi, cum este H și să formeze H_2O_2 , dar în special $HO_2\cdot$ sau $O_2\cdot^-$, care sunt mult mai toxici, sau să producă peroxidarea radicalilor organici liberi (fig. 8.30).

Toxicitatea superoxidului este mult atenuată prin reducerea la H_2O_2 cu ajutorul unei enzime numite superoxid dismutază. După una sau mai multe reacții secundare, radicalii liberi produc molecule stabile, dar cu deviații metabolice, cum ar fi, de exemplu, inactivarea unor proteine enzimatiche sau leziuni mutagene ale ADN.

Organismele vii, puse permanent în fața oxidărilor spontane și formării de radicali liberi, și-au dezvoltat o serie de mecanisme defensive, cu perfecționare continuă în cursul evoluției onto- și filogenetice.

8.6.1.2. Radicalii liberi ai O_2 și stresul oxidativ

În ultimele decenii s-au acumulat numeroase dovezi clinico-experimentale în favoarea participării O_2 nu numai la realizarea reacțiilor oxido-reducătoare energogene indispensabile respirației celulare și supraviețuirii organismelor aerobe, ci și la producerea de radicali liberi prevăzuți cu proprietăți toxice.

În condiții metabolice normale, oxigenul molecular, ca element oxidant puternic, suferă procese de reducere bivalentă prin captarea a doi electroni, cu participarea lanțului respirator mitocondrial reprezentat de sistemul citocromi-citocrom oxidază. Doar 2–3% din O_2 ajuns la nivel celular scapă și se „scurge” pe o altă cale, neenzimatică, suferind procesul de reducere parțial univalentă, de către un singur electron, pentru a forma specii radicalare ale O_2 (SRO), înalt reactive, producătoare de injurii multiple celulare și tisulare, cunoscute sub numele generic de „stres oxidativ”.

Reducerea parțială univalentă a oxigenului molecular realizează formarea anionului superoxid ($O_2\cdot^-$), ca precursor al cascadei reacțiilor radicalare producătoare de noi specii reactive reprezentate de peroxidul de hidrogen (H_2O_2), radicalul hidroxil ($HO\cdot$) și oxigenul singlet (O_2), rezultat prin trecerea unui electron nepereche pe un nivel energetic superior.

Generarea în etape succesive a principalilor radicali liberi ai O_2 , cu unul sau mai mulți electroni nepereche pe ultimul orbital, este prezentată în fig. 8.31:

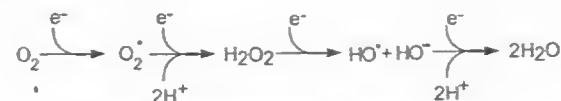


Fig. 8.31. Reducerea treptată a O_2 formatoare de SRO.

Fiind mult mai reactive decât O_2 redus pe cale enzimatică bivalentă de către sistemul citocromi-citocrom oxidază, speciile radicalare determină acroșarea unor componente moleculare ale lipidelor, proteinelor și nucleoproteinelor celulare (ADN, ARN), producând injurii multiple tisulare. Acestea constau în fenomene distructive de peroxidare lipidică membranară, inclusiv mitocondrială și lizozomală, în blocarea grupărilor tiol ale proteinelor active celulare și alterarea ADN nuclear. Cumularea alterărilor oxidative multiple provocate de predominanța enzimelor oxidante ($NADPH - oxidaza$, mieloperoxidaza etc.) și a radicalilor liberi asupra enzimelor antioxidante stă la baza degradării progresive celulare produse de stresul oxidativ.

Intensitatea reacțiilor formatoare de specii reactive ale O_2 depinde atât de participarea mijloacelor de apărare antiradicalară endogenă, reprezentate de enzimele antioxidante de tipul superoxid dismutazei

(SOD), glutation peroxidazei și catalazei, cât și de capacitatea de reparare a alterărilor produse de excesul de radicali liberi (fig. 8.32).

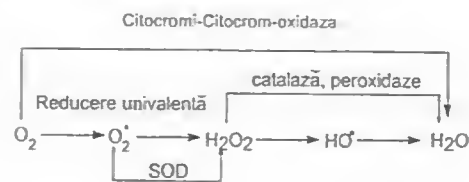


Fig. 8.32. Reducerea bivalentă și univalentă a oxigenului molecular, contracarată de enzimele antioxidante.

În funcție de concentrația radicalilor liberi și activitatea enzimelor antioxidante, speciile radicalare ale O_2 (SRO) și, mai ales, ale radicalilor hidroxil (HO^\bullet) și O_2 singlet, considerați veritabili „monștri moleculari”, determină efecte benefice sau malefice, în multe cazuri toxice. De aici paradoxul O_2 producător atât de efecte fiziologice, cât și patologice.

Din prima categorie, a efectelor benefice (fiziologice), fac parte acțiunile vasculare predominant constrictoare, antibacteriene și antivirale activatoare ale reacțiilor fagocitare, iar din cea de-a doua, proprietățile distructive celulare și moleculare, realizatoare ale unei variate patologii radicalare. Producerea în exces a radicalilor liberi ai O_2 este favorizată de iradiere, hipoxie, stres, ateroscleroză, inflamație, cancerogeneza, fumat, senescență etc.

În ateroscleroza progresivă a vârstnicilor, de pildă, radicalii liberi ai oxigenului, degradând lipoproteinele membranei plasmatică prin peroxidare lipidică, favorizează pătrunderea colesterolului împreună cu LDL oxidate în peretele vascular, însoțită de eliberarea factorilor chemotactici de atragere a macrofagelor din sânge, în vederea transformării lor în celule spumoase moarte, acumulate sub formă de plăci aterosclerotice. La nivel cerebro-spinal, peroxidarea lipidică determină fenomene degenerative (boală Parkinson, Alzheimer etc.) și formarea de lipofuscină ca pigment neuronal al îmbătrânirii.

Cancerogeneza este, de asemenea, pusă pe seama participării radicalilor liberi ai oxigenului, mai ales în cazul proceselor neoplazice de cauză fizică sau chimică.

În ultimii ani, s-a demonstrat că anionul superoxid intră în reacție cu oxidul nitric (NO), formând un agent oxidant puternic, cu acțiune toxică și distructivă celulară de lungă durată, denumit peroxinitrit (ONOO). Acesta realizează nitrarea proteinelor structurale, determinând proteoliză intensă, mai ales la nivelul focarului inflamator și al plăcilor aterosclerotice.

Identificat inițial cu EDNF, NO a devenit în 1992 „molecula anului”, iar, recent, s-a acordat premiul Nobel descoperitorilor acestuia (Furchgott, Ignarro și Murad, 1998). În prezent sunt cunoscute atât căile de formare endogenă din L-arginaina metabolizată pe calea șuntată a ciclului ureei, cu ajutorul nitroxid sintetazelor, constitutivă, neuronală și inductibilă, cât și sursele exogene ale NO, rezultat din metabolizarea substanțelor medicamentoase vasodilatatoare din grupul trinitrinei, nitrurilor și nitroprusiatului. În afara proprietăților miorelaxante vasculare, NO exercită numeroase alte acțiuni fiziologice și toxice, prin intermediul sistemului guanilat ciclază-GMP ciclic. Ca și radicalii liberi ai oxigenului, NO se comportă ca prieten sau dușman, realizând în doze mici neutralizarea speciilor radicalare toxice ale O_2 , iar, în doze mari, contribuie la producerea șocului septic și efectelor distructive ale peroxinitritului (ONOO), rezultat din cuplarea NO cu radicalul superoxid al O_2 . Este vorba atât de intensificarea nitrării proteinelor și peroxidării lipidelor membranare, precum și de inhibarea metabolismului energetic celular și degradarea ADN-ului nuclear, fenomene ce realizează un adevărat „stres nitrozativ”.

Recent au apărut dovezi experimentale în favoarea implicării și a monoxidului de carbon (CO) în reacțiile biochimice generatoare de stres oxidativ. Biosinteza acestuia este catalizată de hemoxigenaza prezentă atât la nivelul hematiilor, cât și în alte structuri celulare și, mai ales, la nivel vascular endotelial și neuronal cerebral.

Sub influența hemoxigenazei se produce clivarea hemului circulant rezultat din degradarea hemoglobinei și eliberarea biliverdinei (bilirubină), monoxidului de carbon (CO) și Fe^{2+} (ferritină). De precizat că mici cantități de CO pot rezulta și din degradarea altor hemoproteine (mioglobină, protein-enzime etc.).

Pe plan funcțional, s-a precizat că, asemănător oxidului nitric, CO activează guanilat ciclaza citosolică și formarea de GMP ciclic, prevăzută cu proprietăți vasodilatatoare și neuromodulatoare centrale și periferice. Afinitatea CO pentru guanilat ciclază se datorează prezenței fierului heminic în structura acesteia. Fixându-se pe teritoriul receptor heminic al guanilat ciclazei, atât NO, cât și CO, ca radicali liberi gazoși, participă împreună cu speciile radicalare ale oxigenului la realizarea dezechilibrelor moleculare ale stresului oxidativ, întregit de stresul nitrozativ. O complexă interdependență de tip *feed-back* pare să existe între cele trei specii radicalare, întrucât, concomitent cu intrarea în reacție cu anionul superoxid, NO activează hemoxigenaza formatoare de CO, în timp ce, la rândul său, CO inhibă nitroxidsintetaza.

Pentru a evita sau temporiza dezechilibrele existente între speciile radicalare și factorii endogeni antioxidanți, există deocamdată două modalități certe de apărare antiradicalară. O primă categorie de mijloace protective este reprezentată de potențarea enzimelor antioxidante endogene de tipul celor deja menționate (SOD, catalază, glutation peroxidază). Acestea intervin la nivele diferite ale cascadei radicalare, neutralizând speciile reactive respective ale O_2 . Din aceeași categorie, a antioxidantelor endogene, fac parte fosfolipazele, coenzima Q, hormonii estrogeni și mai ales melatonina, hormon indolic pineal.

Din cea de-a doua categorie de substanțe antiradicalare fac parte antioxidantele exogene, numite generic „scavenger-i” (curățători). Acestea sunt reprezentate de vitaminele antioxidante C și E, polifenoli, substanțele flavonoide vegetale, glutatiunul, β -carotennul, seleniul, quercetina, antocianidina și ginkgolidele (din extractele de Ginkgo biloba). O serie de alte principii active naturale sunt testate în prezent ca factori antioxidanți cu posibil rol atât de aliment, cât și de medicament.

8.6.1.3. Forma combinată a O_2

În condiții fiziologice, cantitatea de O_2 transportată sub formă de combinație cu Hb este de aproximativ 70 de ori mai mare decât forma dizolvată fizic în plasmă.

Hemoglobina este o hemoproteină cu funcție de transportor. Este o enzimă alosterică cu greutate moleculară de 64 500. Prezintă numeroase situsuri receptoare specifice, care pot să fixeze reversibil, în funcție de concentrația în mediu, diferiți liganzi, care sunt, în același timp, și efectori alosterici ce interacționează unii cu alții. Fiecare din acești efectori (O_2 , CO_2 , H^+ , ATP) este capabil să modifice conformația proteinei și, în consecință, să-i schimbe afinitatea pentru alți liganzi, în special pentru O_2 și CO_2 .

Hemoglobina este formată din patru catene polipeptidice, dintre care două lanțuri alfa și două lanțuri beta, conținând 141 și, respectiv, 146 de aminoacizi, purtând fiecare câte un atom de Fe în centrul unui nucleu porfirinic. Extremitățile N-terminale ale celor patru lanțuri sunt reprezentate de valină, iar extremitățile C-terminale de arginină, pentru lanțurile alfa, și de histidină, pentru lanțurile beta. Acidul aminat care precedă extremitatea C-terminală este o tirozină, numită și „buton de presiune”, care joacă un rol fundamental în funcționarea moleculei.

Structura secundară a lanțurilor presupune existența a opt segmente helicoidale formate din 7 și 21 de aminoacizi, notate cu litere de la A la H (fig. 8.33), și din segmente fără structură helicoidală, notate cu NA și GH.

Structura terțiară a moleculei este caracterizată prin încolăcirea lanțurilor într-o configurație specifică, cu radicali ionizați către exterior și radicali apolari spre interiorul lanțului. Unele replieri determină cavități sau pungi hidrofobe, din care una, cuprinsă între helixurile F, G și H, adăpostește tirozina („butonul de presiune”), iar alta, formată de helixurile E, F, C, adăpostește hemul fixat de atomii de globină prin legături Van der Waals.

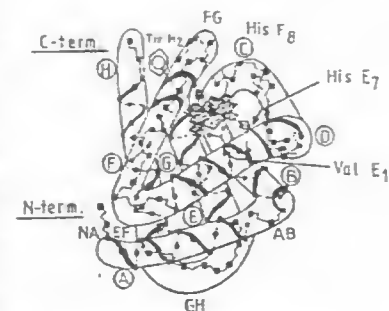


Fig. 8.33. Lanțul β al hemoglobinei.

Poziția atomului de Fe în raport cu planul hemului are implicații funcționale deosebite. În forma redusă (neoxigenată), Fe prezintă cinci legături covalente sau coordinative, cu patru atomi de N din nucleul tetrapirolic, și o legătură covalentă, cu N din nucleul imidazol al histidinei F_5 . În această formă (pentacoordonată), spinul electronic este crescut, iar diametrul atomului de Fe (0,436 nm) este mai mare decât diametrul spațiului central al nucleului tetrapirolic, care este de 0,402 nm. Rezultă că atomul de fier se plasează pasiv în spatele planului hemului, la o distanță de 0,083 nm.

Într-o poziție opusă legăturii cu histidina F_6 se găsesc His E_7 și Val E_{11} . Acestea joacă un rol important în limitarea accesului spre cavitățile hemului; prin reducerea volumului cavității respective se explică reversibilitatea legăturii Fe-oxigen. Ca dovadă a acestui fapt, s-a demonstrat că porfirinele izolate fixează O_2 ireversibil, prin formarea de complexe oxigenate stabile, în punte, între doi atomi de fier. Atunci când ligandul (O_2 sau CO) se fixează pe a 6-a valență a Fe, atomul devine hexacoordonat, formă în care spinul său electronic coboară, diametrul scade, iar atomul se poate plasa în planul nucleului tetrapirolic.

Structura cuaternară se caracterizează prin zone de acroșare între cele patru lanțuri.

Legăturile stabilite între alfa₁ și beta₁, pe de o parte, și alfa₂ și beta₂, pe de altă parte, sunt mobile și intervin în schimbările conformației moleculare. Compoziția lor în acizi aminați este specifică și fixă pentru o anumită specie: orice variație a unui acid aminat printr-un proces mutagen duce la alterări funcționale.

Dimpotrivă, legăturile între lanțurile alfa₁/beta₁ și alfa₂/beta₂ sunt fixe. Acizii aminați din aceste zone sunt variabili la diferite tipuri de hemoglobină, iar eventualele mutații au efecte mai puțin importante privind funcționarea moleculei.

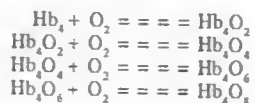
Molecula de hemoglobină poate exista sub două forme în echilibru una cu alta, și anume: forma redusă (R) și forma oxigenată (O): proporția dintre cele două forme depinde de concentrația liganzilor în mediu.

În molecula de hemoglobină funcțională Fe este menținut în stare feroasă, singura capabilă să fixeze labil O_2 . Acest fapt este posibil datorită energiei furnizate prin ciclul pentozic, catalizat prin G6-P dehidrogenază și methemoglobin reductază prin intermediul NADP. Deficitul congenital de methemoglobin reductază face hemoglobina incapabilă să-și exercite funcția de transportor de O_2 .

Hemoglobina satisface toate cerințele unei fixări și cedări prompte și ale unui transport economic.

Gazul respirator este fixat cu ușurință (reacție de oxigenare) și cedat la fel de ușor atunci când presiunea sa parțială este mai scăzută în mediul înconjurător. Reacția se desfășoară rapid (mai puțin de 0,1 s) și nu necesită prezența unor sisteme enzimatic.

Fixarea și eliberarea de O_2 pe molecula de Hb nu se face simultan pentru toți cei patru atomi de fier ai moleculei, ci succesiv, putând fi astfel reprezentată:



Combinarea O_2 cu primul hem crește afinitatea celui de-al doilea pentru O_2 ș.a.m.d., astfel încât al patrulea hem are o afinitate de 125 de ori mai mare comparativ cu primul. Saturația în O_2 se face gradat, mai întâi combinându-se cu O_2 primul hem de la toate moleculele de Hb, apoi complet hemul al doilea ș.a.m.d. Hemoglobina combinată cu O_2 poartă denumirea de oxihemoglobină, iar Hb care a cedat O_2 devine Hb redusă. Concentrația sanguină a hemoglobinei variază între 13–16 g/dl. S-a constatat că 1 mol Hb poate să fixeze de 4 ori mai mult O_2 molar (1 mol O_2 = 22,4 l), reprezentând puterea de oxigenare a Hb (PO):

$$PO = \frac{4 \times 22,4}{64 \times 500} = 1,39 \text{ ml } O_2$$

La fumători, cantitatea fixată variază în jur de 1,20–1,25 ml O_2 , deoarece o parte din atomii de Fe sunt legați cu oxidul de carbon. Poluarea urbană zilnică cu oxid de carbon scade capacitatea de fixare a Hb în O_2 , chiar și la nefumători, până la 1,30 ml O_2 , valoarea de 1,39 fiind considerată ideală (teoretică).

Capacitatea de oxigenare (C.O.) reprezintă volumul maxim de O_2 (STPD) care se poate combina cu Hb; ea depinde, pe de o parte, de cantitatea de Hb aptă din punct de vedere chimic să fixeze O_2 și, pe de altă parte, de o serie de factori care pot influența afinitatea Hb pentru O_2 .

Dacă se consideră valoarea medie a cantității de Hb din sânge de 15 g, atunci:

$$C.O. = 15 \times PO(1,39) = 20,85$$

Variații se admit atât datorită variațiilor cantității de Hb (anemie), cât și PO (formare de methemoglobină sau de HbCO), fiind cuprinse, după diverși autori, între 20,1–20,8.

Raportul care se stabilește între cantitatea de O_2 combinată cu Hb și capacitatea de oxigenare (C.O.) definește *saturația în oxigen*, care este de 95–97% în sângele arterial și 75% în sângele venos.

Dacă se consideră C.O. de aproximativ 20 ml O_2 pentru un sânge cu saturație 100%, atunci în sângele cu saturație de 97% cantitatea de O_2 va fi de aproximativ 19,8 ml O_2 /100 ml sânge, din care 19,5 legat de Hb și 0,3 dizolvat fizic în plasmă. Pentru sângele venos, cantitatea de O_2 va fi de aproximativ 15,2 ml la 100 ml sânge, diferența de 4,6 ml O_2 reprezentând *diferența arterio-venoasă* (DAV = 4–5 ml).

Valorile sunt dependente atât de debitul cardiac, cât și de metabolism, putându-se ajunge până la 15–16 ml în timpul efortului muscular.

Țesuturile beneficiază de o anumită cantitate de oxigen în unitatea de timp, pe care o putem denumi *debit sanguin de O_2* sau *transport arterial de O_2* ($\dot{V}aO_2$) și care este variabilă în funcție de vascularizația teritoriului și cantitatea de O_2 din sângele care îl irigă. Mărimea acestui parametru rezultă din produsul dintre debitul cardiac și concentrația oxigenului (O_2) în sângele arterial și este de aproximativ 1 200 ml/min în repaus:

$$\dot{V}aO_2 = \dot{Q} \cdot CaO_2$$

în care \dot{Q} = debitul cardiac și CaO_2 = concentrația O_2 în sângele arterial.

La nivelul țesuturilor nu se consumă întreaga cantitate de O_2 adusă prin sângele arterial. Cantitatea de O_2 care nu a fost consumată la nivel tisular și care se reîntoarce pe calea circulației venoase la inima dreaptă constituie *debitul venos de O_2* ($\dot{V}vO_2$). Valoarea sa este de aproximativ 1 000 ml/min. $\dot{V}vO_2 = Q \cdot CvO_2$ (unde CvO_2 este concentrația oxigenului în sângele venos).

Diferența care se stabilește între debitul de O_2 arterial și venos reprezintă consumul de O_2 al țesuturilor.

$$\dot{V}O_2 = \dot{V}aO_2 - \dot{V}vO_2 = \dot{Q}(CaO_2 - CvO_2) \text{ sau}$$

$$\dot{V}O_2 = Q \cdot DAV \text{ (ecuația Fick)}$$

în care $\dot{V}aO_2$ = debitul arterial în O_2 ; $\dot{V}vO_2$ = debitul venos în O_2 .

Afinitatea Hb pentru O_2 . Curba de disociere a Hb (CDO). Relația dintre PO_2 și cantitatea de O_2 dizolvată se înscrie grafic sub forma unei drepte, arătând astfel fenomenul simplu, de dizolvare a gazului. Relația între PO_2 și O_2 combinat se înscrie ca o curbă sigmoidă, denumită curbă de disociere, a Hb (Barcroft). Afinitatea Hb pentru O_2 este redusă la valori mici ale PO_2 și crește pe măsură ce aceasta se saturează, P_{50} exprimând PO_2 în momentul în care saturația este de 50%. La om, această presiune este de 26,5 mmHg pentru HbA și de 16 pentru Hb fetală.

Forma curbei de disociere ilustrează capacitatea Hb de a-și îndeplini rolul de transportor în funcție de nevoile metabolice și în special posibilitatea sa de a fixa maximum de O_2 la nivelul membranei alveolo-capilare și de care se debarasează în momentul contactului cu celula beneficiară (fig. 8.34).

Afinitatea Hb pentru oxigen este exprimată prin coeficientul de solubilitate aparentă sau de afinitate (β), care arată volumul de O_2 fixat pe 1 ml de sânge și pe mmHg PO_2 , în condițiile unei concentrații normale de Hb. Acest coeficient include și combinațiile chimice din sânge ale oxigenului.

Valorile consumului de O_2 la nivel tisular variază în repaus (240 ml/min), față de condițiile de efort (5 l/min).

Pentru un anumit nivel metabolic, deci pentru $\dot{V}O_2$ constant, debitul cardiac și DAV sunt parametri care variază în sens invers, după o curbă hiperbolică. Astfel, în cazul unei scăderi a debitului cardiac (șoc, insuficiență cardiacă), DAV crește foarte mult, putând atinge valori de 6–12 ml. Dimpotrivă, în timpul efortului muscular, nevoia de O_2 este acoperită atât prin creșterea debitului cardiac, cât și a DAV, precum și printr-o creștere a ventilației cu până la 20 de ori valoarea normală.

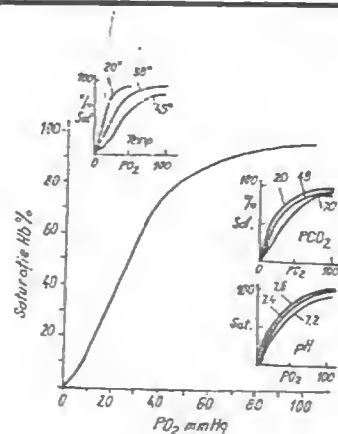


Fig. 8.34. Curba de disociere a hemoglobinei.

îngustarea cavității tirozină – buton de presiune (fig. 8.35) care este expulzat, antrenând cu ea extremitatea C-terminală. Se produce ruperea punților saline între lanțurile alfa și eliberarea protonilor de H^+ , numiți și protoni Bohr. Același mecanism are loc și la nivelul lanțurilor 2 alfa.

Din acest moment sunt distruse punțile între lanțurile alfa. Lanțurile alfa, și alfa, se îndepărtează cu aproximativ 0,1 nm și se rup legăturile între α și β , fără formarea de protoni Bohr.

Lanțurile α se vor apropia cu 0,65 nm, vor închide cavitatea centrală și va urma expulzarea 2,3-DPG. În acest fel, molecula de Hb trece de la forma dezoxi la forma oxigenată (mecanismul modificării alosterice).

Conceput astfel, efectul Bohr poate fi definit sub două aspecte:

a) efectul Bohr constă în eliberarea H^+ în timpul reacției de oxigenare a hemoglobinei. El se produce în cazul fixării O_2 , CO sau NO pe Fe, dar și în cazul formării de methemoglobină prin oxidare. Invers, hemoglobina în forma dezoxi captează H^+ atunci când are loc eliberarea de O_2 și constituie un tampon mai bun ca HbO_2 ;

b) efectul Bohr poate fi definit și ca schimbare a afinității hemoglobinei pentru O_2 în timpul variațiilor de pH ale mediului. Acidoza crește P_{50} prin consolidarea punților saline, cu stabilizarea formei dezoxi și deviere spre dreapta a curbei de disociere;

alcaloza are efecte inverse. P_{50} exprimă convențional afinitatea Hb pentru O_2 , și anume PO_2 , la care cantitatea de Hb aptă pentru a se combina cu O_2 este semisaturată în condiții de temperatură ($37^\circ C$) și pH (7,40).

Rolul fiziologic al efectului Bohr este dublu: favorizează eliberarea O_2 , care are o presiune parțială crescută, datorită acumulării de metaboliți celulari acizi (CO_2 , acid lactic) și, în același timp, tamponează H^+ produși prin metabolism celular.

Influența temperaturii. Temperatura modifică P_{50} prin modificări ale activității ionice, dar și prin influența asupra pH: $\Delta pH = a \cdot T^\circ C$, unde $a = 0.0147$ (coeficientul Rosenthal).

P_{50} variază astfel de la 26 la 32 mmHg, între 37 și $41^\circ C$. În cursul hipotermiei provocate, din contră,

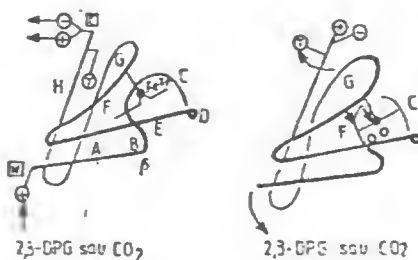


Fig. 8.35. Legarea atomului de O_2 la atomul de Fe din molecula de hemoglobină (vezi textul).

Efectul pH-ului eritrocitar asupra curbei de disociere a hemoglobinei. Molecula de Hb poate să fixeze sau să elibereze, în afară de O_2 , CO_2 , NO, și alți liganzi, cum ar fi: CO, H^+ și fosfați anorganici. Fixarea se poate face pe situsuri specifice sau competitiv pe situsuri comune. Fiecare ligand se comportă ca un efecter alosteric, contribuind la stabilizarea formei dezoxi a moleculei de Hb, reducând afinitatea ei fie pentru O_2 , fie pentru alți liganzi.

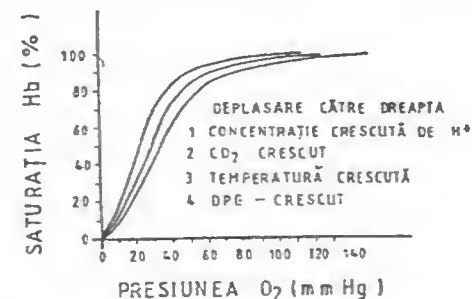
Interacțiunea dintre ionii de O_2 și H^+ este cunoscută sub denumirea de efect Bohr.

Fixarea succesivă a moleculelor de O_2 la nivelul fiecărui lanț din molecula de Hb favorizează accesul unor noi molecule de O_2 , crescând afinitatea pentru acest ligand.

Rezultă că O_2 este efecter alosteric al propriei sale fixări.

Inițial are loc o deplasare a atomului de Fe cu 0,083 nm. Acesta, prin fixarea unei molecule de O_2 , își scade diametrul cu 0,038 nm. O_2 se plasează în planul moleculei de hem, antrenând cu el His F, la care se găsește conectat helixul F. Helixul F se va deplasa astfel, datorită legăturii rigide pe care o are cu His F, spre centrul lanțului. Se produce o mișcare de levier, care amplifică deplasarea, producându-se rotirea segmentului FG și

Fig. 8.36. Factori care influențează curba de disociere a hemoglobinei.



eliberarea de O_2 la nivelul țesuturilor poate fi scăzută (devierea spre dreapta a curbei de disociere a Hb în fig. 8.36).

Influența CO_2 asupra CDO (curba de disociere a oxihemoglobinei). Creșterea PCO_2 produce o deplasare spre dreapta a curbei de disociere a hemoglobinei; acest efect se poate datora, pe de o parte, formării de H_2CO_3 , care va coborî în final pH-ul, fie fixării CO_2 pe grupările aminice ale Hb, cu formare de carbamați ($Hb-NH-COO^-$), efect specific ce are loc la un pH constant. Fixarea se face numai pe radicalii NH_2 , nu și NH_3^+ , H^+ .

Sinteza acestora depinde de SO_2 , de pH și de 2,3-DPG și nu este influențată de PCO_2 . Astfel, alcaloza intensifică sinteza:



În felul acesta, pH-ul scăzut crește tendința de ionizare a radicalilor aminați, iar reacția de formare a carbamaților este limitată printr-o reacție ascendentă de disociere a NH_3 :



Formarea de carbamați este însoțită, de asemenea, de formare de H^+ .

S-a constatat că sinteza de carbamați este practic independentă de PCO_2 , deoarece, cu cât CO_2 este în concentrație mai mare, cu atât pH este mai scăzut, iar radicalii aminați care ionizează limitează formarea de carbamați. Fixarea CO_2 pe HbO_2 se face numai la nivelul lanțurilor α , deoarece lanțurile β sunt atât de apropiate, încât grupările N-terminale sunt în apropiere de carboxilul C-terminal de la lanțul β opus, ceea ce împiedică fixarea CO_2 . În acest fel, formarea carbamatului pe lanțurile β se face numai prin desaturarea HbO_2 (carbamați oxidabili). Astfel s-a explicat că sângele venos sărac în O_2 se poate încălca cu o cantitate apreciabilă de CO_2 , produs prin metabolismul celular, fără ca PCO_2 să varieze. În realitate, diferența de comportament între Hb și HbO_2 în ceea ce privește legarea CO_2 este atenuată de către 2,3-DPG (2,3-difosfoglicerat).

Se poate spune că CO_2 are următoarele efecte asupra curbei de disociere a Hb (fig. 8.37):

- un efect Bohr, prin formarea CO_2H_2 ;
- un efect specific, mai puțin important, asemănător efectului Bohr, prin sinteza de carbamați, care stabilizează forma dezoxi a Hb;
- un efect anti-Bohr (efect Bossi-Bernardi).

La nivelul țesuturilor are loc, pe de o parte, eliberarea O_2 cu reconstituirea punților saline și captarea de către Hb a protonilor Bohr, și, pe de altă parte, fixarea CO_2 cu formarea carbamaților, însoțită de eliberarea unei părți din protonii Bohr captați. La nivelul plămânului se produce secvența inversă a fenomenelor, când are loc fixarea O_2 . În cazul acidozei există o competiție pentru fixarea pe Hb între H^+

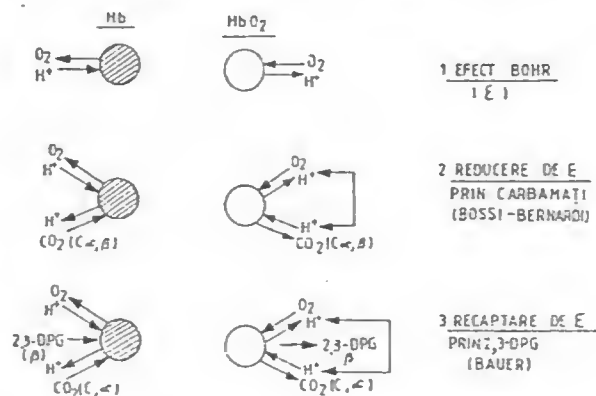


Fig. 8.37. Efectul Bohr.

extrinseci și H^+ proveniți din sinteza de carbamați. Deci, sinteza de carbamați are, pe de o parte, rolul de a favoriza transportul CO_2 de la țesuturi la plămân, dar, pe de altă parte, prezintă dezavantajul că reduce la aproximativ jumătate efectul Bohr prin eliberarea de H^+ .

Influența 2,3-DPG asupra afinității hemoglobinei pentru O_2 și CO_2 . 2,3-DPG este un metabolit specific glicolizei eritrocitare, sinteza sa fiind legată de o enzimă care se găsește exclusiv la nivelul hematiei (DPG mutaza).

2,3-DPG scade afinitatea pentru O_2 a Hb printr-un dublu mecanism: pe de o parte, scade pH eritrocitar și se fixează la nivelul cavității centrale a lanțului β de la nivelul Hb-dezoxi, care este electropozitivă, fapt care îi stabilizează structura. Forma oxigenată a Hb, lipsită – așa cum s-a arătat anterior – de cavitățile centrale, nu fixează 2,3-DPG. Efectul 2,3-DPG asupra curbei de disociere apare chiar la variații foarte mici ale concentrației sale; pe de altă parte, 2,3-DPG intră în competiție cu CO_2 pentru valina terminală din lanțurile β ale Hb reduce. În acest fel reduce la jumătate sinteza de carbamați care se formează prin desaturarea HbO_2 . Deci, β -carbamații oxidabili sunt dependenți de prezența și concentrația 2,3-DPG. Aceasta reduce efectul anti-Bohr al CO_2 . Mecanismele care controlează formarea de 2,3-DPG nu sunt suficient cunoscute, dar se cunosc o serie de factori favorizanți.

Astfel, sinteza 2,3-DPG este stimulată de alcaloză, de scăderea saturației în O_2 , reducerea concentrației de Hb și, probabil, prin mecanism *feed-back* de scădere a concentrației sale în eritrocite. Concentrațiile crescute de 2,3-DPG în forma dezoxi a Hb cresc proporția formei legate a 2,3-DPG în detrimentul fracțiunii libere, ceea ce are ca urmare activarea DPG mutazei.

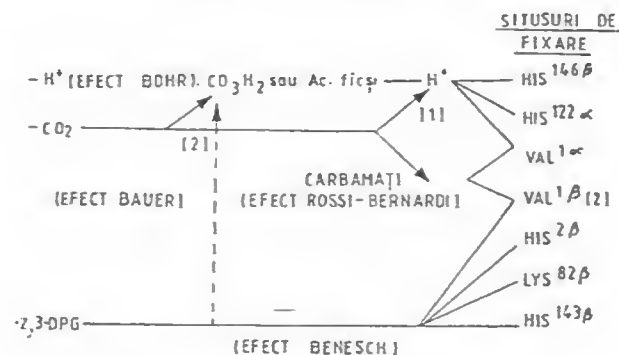
Se poate afirma că există o reală interacțiune între diferiții liganzi ai Hb, cu efecte evidente asupra curbei de disociere.

Ionii de H^+ , CO_2 și 2,3-DPG interacționează atât între ei, cât și cu molecula de Hb, modificând în același timp transportul O_2 , CO_2 , H^+ .

Efectul asupra curbei de disociere este complex; P_{50} poate fi interpretată numai prin participarea simultană a pH, temperaturii, PCO_2 și a 2,3-DPG (fig. 8.38).

Astfel, CO_2 exercită efectul Bohr prin intermediul CO_2H_2 , un efect specific, și un efect anti-Bohr; variațiile de temperatură modifică PO_2 și produc, în consecință, modificări ionice de pH și PCO_2 , 2,3-DPG deplasează la dreapta curba de disociere a Hb, prin scăderea pH intraeritrocitar. De asemenea, produce o scădere a sintezei de carbamați și a efectului anti-Bohr al CO_2 .

Acidoza deplasează către dreapta curba de disociere (efect Bohr), ionizează radicalii aminați și scade sinteza de carbamați. De asemenea, pH-ul scăzut antrenează în timp foarte scurt o reducere a sintezei de 2,3-DPG, care tinde să readucă spre stânga curba de disociere. Alcaloza exercită efecte inverse.

Fig. 8.38. Principalii factori care controlează P_{50} și interacțiunea lor.

Variațiile curbei de disociere a Hb au însemnate implicații funcționale. Astfel, deplasarea spre stânga ușurează captarea și stocarea O_2 , iar deplasarea către dreapta favorizează eliberarea O_2 spre țesuturi.

În cursul unui efort intens, are loc la nivel tisular o eliberare crescută de metaboliți acizi și de CO_2 , odată cu creșterea temperaturii locale și a 2,3-DPG. În aceste condiții, deplasarea spre dreapta a curbei de disociere traduce o eliberare marcată a aportului de O_2 necesar la o presiune crescută (fig. 8.39).

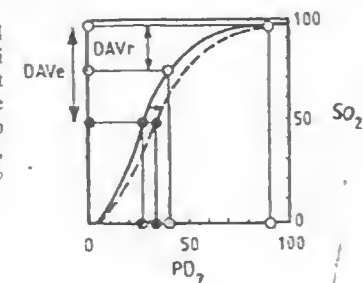
Deplasarea organismului la mari altitudini (peste 4 000 m) este însoțită de o creștere a 2,3-DPG, datorită stării de desaturare în O_2 și alcalozei respiratorii. Are loc o creștere a P_{50} cu 2–5 mmHg în 24 de ore.

Aceste manifestări coexistă cu celelalte mecanisme adaptative: hiperventilația și creșterea cantității de Hb.

În unele cazuri, transfuziile de sânge conservat pot produce, în câteva zile, distrugerea 2,3-DPG, urmată de deplasarea la stânga a curbei de disociere și de scăderea P_{50} până la 18 mmHg. Deși oxigenarea tisulară nu este ameliorată, deși cantitatea de O_2 transportată spre țesuturi este mare, O_2 rămâne legat de Hb.

Influența CO . Hemoglobina are o afinitate de 2–300 de ori mai mare pentru oxidul de carbon (CO) decât pentru O_2 ; P_{50} pentru CO este de aproximativ 0,1 mmHg. O concentrație de 1% CO în aer este suficientă pentru ca jumătate din Hb să fie saturată în CO , deci inutilizabilă în transportul CO_2 .

O aceeași reducere a concentrației O_2 în sângele arterial este diferit suportată de organism dacă se datorește unei anemii sau unei intoxicații cu CO . Deși în ambele situații atât P_{50} , cât și PvO_2 , au valori foarte scăzute, eliberarea O_2 spre țesuturi este împiedicată numai în cazul intoxicației cu CO . Astfel, în timp ce o anemie de 7,5 g Hb/dl sânge poate fi relativ ușor suportată, existența unei HbCO (carboxihemoglobinei) în proporție de 50% este mortală.

8.6.1.4. Rezervele de O_2 ale organismului

Rezervele de O_2 ale organismului sunt reduse, pe de o parte, pentru că este puțin solubil, iar, pe de altă parte, forma sa combinată se găsește în sectoare limitate (1 000 ml în circulație și aproape 400 ml în plămân la CRF sau 900 ml la CPT). La nivelul mioglobinei se stochează numai 150–200 ml. Aceste

Fig. 8.39. Deplasarea spre dreapta a curbei de disociere a hemoglobinei în momentul eliberării O_2 spre țesuturi, în timpul efortului muscular. DAVE, DAVr, diferența arterio-venoasă de expir și inspir.

mici rezerve nu pot să asigure însă nevoile organismului în apnee pentru mai mult de 4 minute în condiții de repaus. La începutul unui efort muscular, consumul de oxigen crește mai repede decât ventilația și debitul cardiac și se constituie astfel o datorie de O_2 .

Variațiile ventilației influențează PaO_2 și mai puțin $PaCO_2$. Limita de apnee la indivizii antrenati este de 2-4 minute, moment în care PaO_2 este de aproximativ 30 mmHg, iar PaO_2 este aproape egală cu PvO_2 , respectiv cu 20 mmHg.

8.6.2. TRANSPORTUL SANGUIN AL BIOXIDULUI DE CARBON

CO_2 este principalul „deșeu” al metabolismului oxidativ, iar acidul carbonic format prin combinarea sa cu apa, principalul metabolit acid al organismului. Sistemul CO_2 /bicarbonat este implicat major ca sistem tampon al acidității, în special în sectorul extracelular.

CO_2 este prezent în sânge sub formă de: CO_2 dizolvat, H_2CO_3 , bicarbonați și de CO_2 legat de Hb. Concentrația primelor trei forme este dependentă de PCO_2 . Presiunea CO_2 variază în mod normal în sângele arterial între 37 – 43 mmHg, fiind aproape egală cu presiunea alveolară a gazului (P_ACO_2):

$$P_ACO_2 = PaCO_2 - 1 \text{ sau } 2 \text{ mmHg}$$

În sângele venos amestecat și la nivelul țesuturilor, presiunea CO_2 este de 43-48 mmHg în repaus. În timpul unui efort intens poate ajunge până la 70-90 mmHg, fără ca $PaCO_2$ să varieze, deoarece excesul este eliminat prompt la nivelul plămânilor.

8.6.2.1. Forma dizolvată a CO_2

Forma dizolvată a CO_2 se găsește în cantitate redusă (3-5% din totalul de CO_2 în sângele arterial și valori puțin mai ridicate în sângele venos). Concentrația CO_2 dizolvat în sângele arterial normal este de 25 ml/l, fiind direct proporțională cu PCO_2 (legea Henry).

CO_2 dizolvat se găsește sub două forme: CO_2 gazos și H_2CO_3 , forma gazoasă fiind de aproape 700 de ori mai abundentă decât H_2CO_3 . H_2CO_3 eliberează ușor și rapid mari cantități de H^+ ; întrucât CO_2 dizolvat se găsește aproape în întregime sub formă gazoasă, rezultă că numai cantități mici de H_2CO_3 vor disocia și vor elibera H^+ :



8.6.2.2. Forma combinată a CO_2

CO_2 se găsește în stare combinată sub mai multe forme: bicarbonați, legat de proteine sau de hemoglobină (carbamați) și în combinații la nivelul oaselor (carbonați).

Hematiile au un rol esențial în transportul și metabolismul CO_2 , deoarece ele asigură, pe de o parte, sinteza unei mari cantități de bicarbonați iar, pe de altă parte, fixează pe Hb o cantitate mică de gaz carbonic (carbamați) cu importanță fiziologică deosebită (fig. 8.40).

Sinteza de carbamați și bicarbonați este cu atât mai importantă, cu cât Hb este mai desaturată (efect Haldane), ceea ce permite transportul cuplat al CO_2 și al O_2 , deoarece fixarea CO_2 este favorizată prin desaturarea Hb și, invers, eliberarea CO_2 este facilitată prin reoxigenarea Hb.

Bicarbonații, sisteme tampon care se găsesc din abundență atât intra-, cât și extracelular, se formează pornind fie de la CO_2 și H_2CO_3 , produși de către țesuturi, fie de la HbO_2 și Hb redusă și mai puțin prin proteinele din plasmă și fosfatul disodic, care sunt acizi mai puternici decât HCO_3^- .

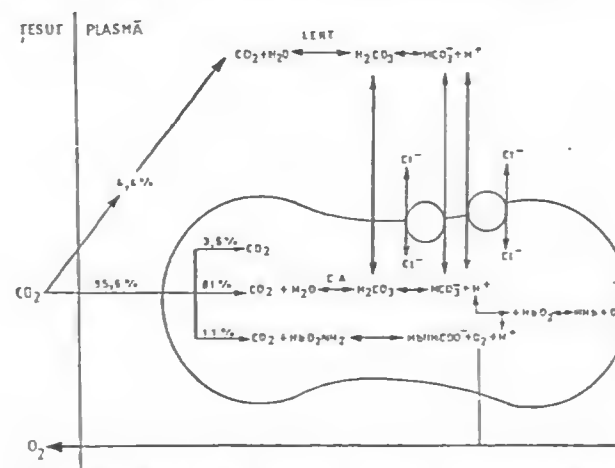


Fig. 8.40. Forme (dizolvată și combinată) de transport al CO_2 de la țesuturi la plămâni. C.A., anhidraza carbonică.

Fixarea H^+ pe Hb se face după următoarea reacție:



unde C^+ reprezintă Na^+ sau K^+ , iar $A^- = Hb$ sau eventual alte proteine.

Sinteza din bematie este mai rapidă și mai importantă decât sinteza la nivel plasmatic, deoarece, pe de o parte, Hb este în concentrație mai mare comparativ cu proteinele plasmatice și, pe de altă parte, anhidraza carbonică globulară este capabilă să accelereze de 2 000 de ori viteza reacției preliminare: $CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3$.

Sinteza de bicarbonați și, în consecință, puterea de sistem tampon a sângelui depind de concentrația Hb, dar, în același timp, și de gradul de desaturare în O_2 , astfel încât echilibrarea unei acidoze asociate cu anemie și hiperoxie este dificilă.

În funcție de intensitatea și rapiditatea sintezei de bicarbonați în hematie se creează un gradient de concentrație eritro-plasmatic al HCO_3^- care favorizează migrarea în plasmă a acestui ion.

Membrana hematiei este mai permeabilă la anioni, față de cationi. În consecință, această pierdere de sarcini negative nu poate fi compensată în interiorul hematiei decât printr-un influx de anioni plasmatici, dintre care Cl^- este cel mai important până când sunt respectate condițiile echilibrului Gibbs-Donnan (fenomen de membrană Hamburger). Astfel, aproape toată cantitatea de bicarbonați din sânge, incluzând și pe cei plasmatici, provine prin sinteza intraeritrocitară. Bicarbonații rezultați se găsesc sub formă de CO_3HNa în plasmă și de CO_3HK în bematii, cei plasmatici reprezentând rezerva alcalină (a se vedea fenomenul Hamburger la capitolul de sânge).

Formarea de HCO_3^- și Cl^- în celulă este însoțită de o creștere a osmolarității hematiei de la 3 la 4 mOsm/l de hematii, modificând presiunea osmotică de la 75 la 100 cmH₂O. Ca urmare, volumul hematiei crește cu aproape 1% în capilarele sistemice.

Reacțiile descrise se derulează în sens invers atunci când sângele traversează plămânul. Cea mai mare parte a CO_2 care este eliminat în aerul alveolar provine din bicarbonați, iar restul, din CO_2 dizolvat sau legat de Hb.

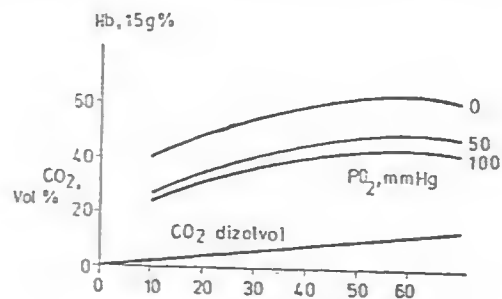


Fig. 8.41. Curba de disociere a bioxidului de carbon.

În sânge, CO_2 se găsește și sub formă de carbamați. Concentrația acestei forme variază în sângele arterial ($0,4 \text{ mmol/l}$) față de sângele venos ($0,6 \text{ mmol/l}$) în repaus și $1,2 \text{ mmol/l}$ în cazul desaturării complete).

Radicali carbamați se formează prin fixarea directă a CO_2 molecular la nivelul terminărilor NH_2 a lanțului de Hb și de proteinele plasmatiche: Hb-NH-COO^- , cu eliberarea unei cantități însemnate de H^+ ($1,5 \text{ mmol H}^+$ pentru fiecare mmol de CO_2 fixat).

Sinteza acestor compuși este direct proporțională cu pH și cu gradul de desaturare și este scăzută de către 2,3-DPG, fiind independentă de PCO_2 .

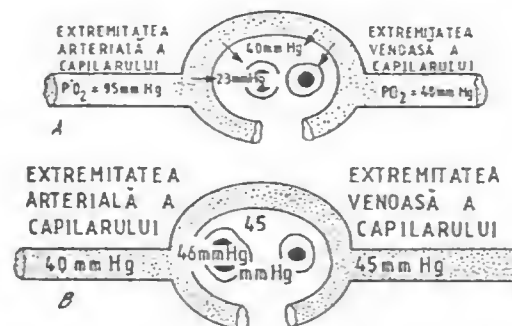
8.6.2.3. Curba de disociere a CO_2 sanguin

Reprezintă rezultanta curbelor pentru cele patru forme de transport al CO_2 și prezintă o serie de caracteristici. Astfel, curba nu atinge un platou; conținutul sângelui în CO_2 crește pe măsură ce crește PCO_2 în sânge. Disocierea CO_2 în funcție de PO_2 este prezentată în fig. 8.41. Conținutul sanguin în CO_2 nu se poate exprima în procente față de saturația totală, deoarece pe curbă nu poate fi precizat un „punct de saturație totală”.

Disocierea și eliberarea bioxidului de carbon la nivel pulmonar este favorizată atât de diferența de presiune parțială a CO_2 , mai mare în sânge decât în alveole, cât și de presiunea parțială mare a O_2 , care duce la formarea de oxihemoglobină acidă. Între O_2 și CO_2 există o interdependență în raport de presiunea lor parțială. Cele două gaze se disociază reciproc: la nivel tisular, presiunea parțială crescută a CO_2 favorizează acidifierea și eliberarea O_2 (efect Bohr) iar, la nivelul plămânilor, presiunea parțială crescută a O_2 determină disocierea CO_2 din combinațiile sale din sânge (efect Haldane).

8.7. RESPIRAȚIA TISULARĂ

Respirația tisulară, ca etapă finalizatoare a funcției respiratorii, coostă în schimburile gazoase ce au loc la nivel celular în timpul degradărilor oxidative ale nutriențelor, cu participarea oxigenului molecular. Difuzând în teritoriul arteriolo-capilar spre celulele beneficiare, oxigenul este consumat în metabolismul oxidativ, iar bioxidul de carbon rezultat va fi preluat și transportat de circulația venoasă de întoarcere, în vederea eliminării sale pe cale pulmonară.

Fig. 8.42. A: Presiunea parțială a oxigenului la nivelul capilarului arterial, al spațiului interstițial și al celulei. B: Presiunea parțială a CO_2 în sângele capilar, spațiul interstițial și celulă.

Actul complex al respirației tisulare se realizează cu participarea a două mari categorii de procese. O primă categorie este reprezentată de procesele fizice de difuziune a celor două gaze respiratorii, determinate de gradientele de presiune parțială din sectoarele: capilar, interstițial și celular. Cea de a doua categorie de procese are la bază reacții chimice oxido-reductoare cuplate cu fosforilări oxidative eliberatoare de energie.

Procesele fizice, asemănătoare celor de la nivel pulmonar, constau din difuziunea gazelor respiratorii pe baza diferenței de presiune parțială a acestora și se realizează între sânge și celulele beneficiare prin intermediul lichidului interstițial. În sângele capilar arterial, presiunea parțială a oxigenului (PO_2) este de 95 mmHg , iar a bioxidului de carbon (PCO_2) variază în jurul a 40 mmHg . În lichidul interstițial, care face oficiul de punte între capilare și celulele înconjurătoare, PO_2 este numai de 40 mmHg . Ea depinde de viteza de transport a O_2 din sânge spre țesuturi și de intensitatea proceselor de utilizare a acestuia de către celule. La nivel intracelular, PO_2 este și mai mică, prezentând variații între $5-40 \text{ mmHg}$, cu o valoare medie de 23 mmHg (fig. 8.42). Diferența mare de presiune parțială a O_2 din sânge și celule determină difuziunea rapidă a acestuia din teritoriul arteriolo-capilar la celulele beneficiare. La rândul său, CO_2 rezultat din combustii celulare prezintă o presiune parțială de $45-46 \text{ mmHg}$ la nivel intracelular și interstițial, în timp ce în sângele arterial aceasta este de 40 mmHg . Deși diferența de presiune parțială a CO_2 este doar de $5-6 \text{ mmHg}$, deplasarea acestuia din interstițiu spre capilarul sanguin se realizează exploziv datorită mării sale difuzibilități. În felul acesta, aportul de oxigen este dublat de eliminarea simultană a bioxidului de carbon. Debitul sanguin scăzut și procesele metabolice tisulare iotose conduc la o creștere a PCO_2 și, invers, creșterea fluxului de sânge sau scăderea intensității metabolismului celular se însoțesc de reducerea valorilor PCO_2 tisular.

Procesele chimice ale respirației tisulare sunt reprezentate de reacțiile oxido-reductoare cuplate cu cele de fosforilare oxidativă, în vederea combustiei substanțelor nutritive și eliberării de energie necesară diverselor forme de activitate celulară. Procesul de degradare a nutriențelor la nivelul celulelor vii se realizează pe cale predominant aerobă, cu participarea oxigenului molecular ca factor indispensabil reacțiilor oxido-reductoare. Pentru ca oxidațiile biologice să se desfășoare cu randament energetic maxim, atât substraturile glucidice (monozaharide), proteidice (aminoacizi) și lipidice (acizi grași), cât și oxigenul molecular trebuie să se găsească în concentrații suficiente la nivel celular.

8.7.1. ETAPELE RESPIRAȚIEI CELULARE

Respirația celulară se desfășoară în patru etape:

- degradarea anaerobă a glucozei în citoplasma celulei și oxidarea acizilor grași în mitocondrii;
- decarboxilarea și oxidarea produșilor intermediari rezultați în ciclul Krebs cu eliberare de CO_2 , apă, electroni și H^+ ;
- transferul H^+ și electronilor în lanțul transportor de electroni până la O_2 molecular, urmat de eliberarea unor importante cantități de energie liberă;

d) stocarea unei părți din energia produsă în legăturile macroergice ale ATP, ca urmare a fosforilării ADP, cuplată cu transportul de electroni. Ultimele trei etape ale respirației celulare au loc la nivel mitocondrial, în prezența unor cantități adecvate de O_2 . Aproape 90% din O_2 consumat de către celule este folosit în reacțiile oxidative mitocondriale eliberatoare ale unor mari cantități de energie. În lipsa oxigenului, metabolizarea nutrienților se realizează pe cale anaerobă cu randament energetic redus, de aproximativ 15 ori mai mic decât în aerobioză, necesitând cantități mult mai mari de substraturi energogene. De aceea, deficitul de O_2 poate fi supleat numai pentru scurt timp de glicoliza anaerobă sau de rezervele energetice de ATP și creatinfosfat. Excepție fac doar cartilajele, celulele retiniene și hematiele, prevăzute cu metabolism predominant anaerob. Degradarea glucozei se realizează în acest caz numai până la stadiul de acid piruvic în citoplasma celulară, cu formarea doar a două molecule de ATP. Energia astfel eliberată reprezintă mai puțin de 5% din rezervele energetice ale celulei.

În prezența oxigenului, atât acidul piruvic ca produs final al glicolizei anaerobe, cât și acizii grași și o mare parte din aminoacizi sunt convertiți în acetil coenzimă A (acetil CoA) la nivelul matricei mitocondriale. La rândul său, acetil CoA este degradată în ciclul acizilor tricarboxilici, descris de Krebs, până la stadiul de CO_2 , apă și un mare număr (24) de atomi de hidrogen. În timp ce CO_2 difuzează în afara celulei, atomii de hidrogen se combină cu substraturile transportoare de la nivelul creștelor mitocondriale bogate în enzime oxido-reductoare. Acestea sunt dispuse la suprafața creștelor în așa fel încât produsul unei reacții să fie predat enzimei următoare până la stadiul final de combinare a atomilor de hidrogen cu oxigenul molecular. O mare parte din energia eliberată în timpul acestor reacții secvențiale de oxidare și reducere a substraturilor este depozitată în legăturile fosfatice ale ATP, format în paralel, ca urmare a cuplării reacțiilor oxido-reductoare cu cele de fosforilare oxidativă (fig. 8.43).

Dinamica reacțiilor oxido-reductoare este asigurată de participarea dehidrogenazelor și oxidazelor mitocondriale. Oxidarea constând în pierderea de electroni, iar reducerea în câștig de electroni, într-un prim moment are loc eliberarea atomilor de hidrogen de pe substraturi, sub influența dehidrogenazelor din matricea mitocondriilor, dependente de coenzimele nicotinamidice (NAD, NADP) și riboflavinice (FAD, FMN), urmată de oxidarea și disocierea lor în câte un proton de hidrogen și un electron cu ajutorul ubiquinonei (coenzimei Q).

Electronii îndepărtați de pe atomul de hidrogen intră în lanțul transportor de electroni de la nivelul creștelor mitocondriale, deplasându-se până la citocromul a_3 (citocrom oxidază), care se autooxidează cedând doi electroni în vederea activării oxigenului molecular și formării cu H^+ a unei molecule de apă. Secvența citocromilor în lanțul respirator depinde de valoarea potențialului redox, care crește progresiv de la citocromul b spre termenul final al lanțului, citocromul a_3 .

Concomitent cu activarea lanțului transportor de electroni de către enzimele oxido-reductoare de la nivelul membranei interne a creștelor mitocondriale, protonii de hidrogen (H^+) sunt pompați de către energia rezultată din reacțiile respective în spațiul dintre membrana internă și cea externă a mitocondrii, creând un gradient de pH și o diferență de potențial electric membranar. Datorită acestui fapt, H^+ se scurg prin membrana internă spre matricea mitocondrii, activând o ATP sintetază membranară formatoare de ATP dintr-o moleculă de ADP și un fosfat anorganic. În felul acesta, energia rezultată din oxidări este folosită la stabilirea unui gradient protonic necesar sintezei de ATP. După Mitchell, fosforilarea oxidativă se datorește fenomenelor chimio-osmotice determinate de pomparea protonilor de hidrogen în afara membranei

interne mitocondriale de către transportul de electroni. Gradientele membranare astfel realizate furnizează energia necesară fosforilării ADP. Mai exact, membrana internă de la nivelul creștelor mitocondriale, fiind impermeabilă la ioni dar permeabilă la protoni, folosește energia liberă a fluxului de electroni ca principală forță de pompare și translocare a H^+ în afara membranei, comportându-se ca o veritabilă pompă de protoni. Distribuția asimetrică a H^+ creează un gradient electro-chimic membranar în citosol, cu sarcini pozitive, acide, la exterior, și negative, alcaline, pe fața internă în matricea mitocondrială, generând un potențial electric de membrană, ce contribuie la forța de translocare a H^+ în afara membranei interne (fig. 8.44).

Conform teoriei cuplării chimio-osmotice a lui Mitchell, protonii de hidrogen (H^+) pompați în afara membranei interne revin datorită gradientului de concentrație în matricea mitocondrială printr-o zonă membranară prevăzută cu două subunități fosforilante (F_0 și F_1) ce proiectează în matrice, cuplate cu o ATPază formatoare de ATP. Localizarea atât a lanțului transportor de electroni, cât și subunităților fosforilante conținătoare de ATPază pe fața internă a membranei mitocondriale asigură pomparea în afară a protonilor de hidrogen (H^+), urmată de sinteza ATP în momentul revenirii lor în matricea mitocondrială. Traversând zona membranară prevăzută cu subunități fosforilante și ATPază (cu rol posibil de canal specific de H^+), protonii de hidrogen se combină cu oxigenul activat în lanțul transportor de electroni la nivelul citocrom oxidazei pentru a forma H_2O și a realiza și sinteza de ATP. Energia eliberată în timpul rânversării fluxului de H^+ favorizează activarea P_i și cuplarea sa cu ADP în vederea formării de ATP. În felul acesta, reacțiile energogene oxido-reductoare se cuplează cu cele de fosforilare oxidativă, generând ATP necesar diverselor forme de activitate celulară. Dacă membrana internă devine permeabilă, atunci protonii generați în cîrnsul

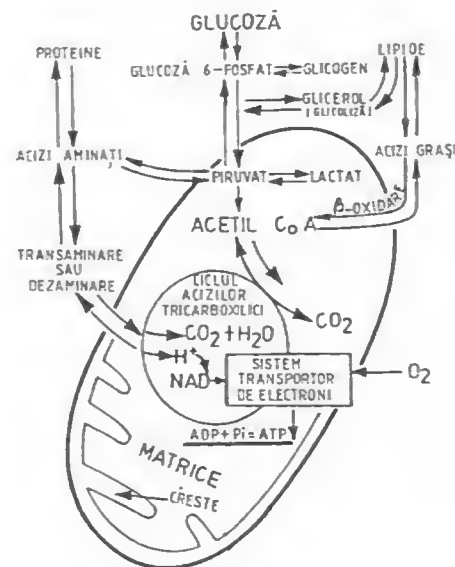


Fig. 8.43. Oxidările biologice mitocondriale.

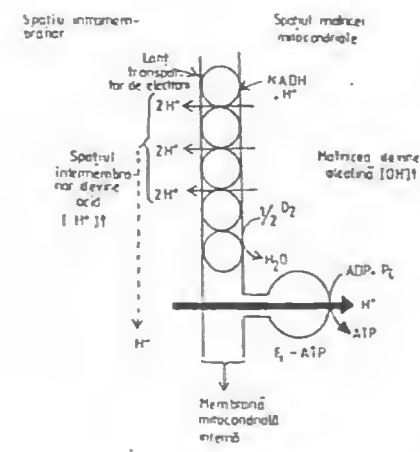


Fig. 8.44. Fenomenele chimio-osmotice mitocondriale.

transportului electronilor se scurg înapoi în matricea mitocondrii, împiedicând formarea gradientului necesar fosforilării. Acesta este cazul decuplării fosforilării oxidative de tipul 2,4-dinitrofenolului, care, fiind acizi slabi, transportă protonii din citosol în matrice, compromițând sinteza de ATP.

Cum din activarea fiecărui atom de oxigen rezultă trei molecule de ATP, randamentul reacțiilor oxidoreductoare cuplate cu cele de fosforilare oxidativă este de 36 de molecule de ATP pe mol gram de glucoză.

Implicații funcționale. Ca principală „monedă” energetică, ATP se formează și se consumă în permanență, oferind 12 000 de calorii în condiții fiziologice de degradare. Utilizat în scop energetic, plastic și funcțional, ATP asigură energia necesară transportului activ membranar, conducerii nervoase, contracției musculare, secrețiilor glandulare, sintezei de componente celulare, creșterii etc. Numai transportul activ necesar absorbției și menținerii gradientelor electro-chimice membranare consumă până la 25% din ATP celular.

Consumul de O_2 , capabil să satisfacă nevoile energetice ale organismului uman în condiții bazale, de repaus, este de aproximativ 250 ml/min. Cantitatea de CO_2 formată în aceste condiții variază în jurul a 200 ml/min. Raportul între bioxidul de carbon eliberat și oxigenul consumat poartă numele de coeficient

respirator. În condițiile unei alimentații mixte, coeficientul respirator este de 0,85 ($\frac{200}{250}$). El diferă în funcție de regimul alimentar, fiind egal cu 1 când predomină hidrocarburile în alimentație, cu 0,7 în cazul lipidelor și 0,8 pentru proteine.

Consumul de oxigen la nivel tisular diferă de la un organ la altul în funcție de vârstă, starea de repaus sau de activitate, intensitatea și durata efortului, gradul de adaptare la solicitările fizice, psihice, termice, ambientale etc. În general, consumul de oxigen este mult mai ridicat la nivelul miocardului, substanței cenușii cerebrale, ficatului și rinichilui decât în cazul altor țesuturi și organe. Creierul, de exemplu, deși reprezintă 2,5% din greutatea corporală, consumă aproximativ 25% din cantitatea de oxigen consumată de organism în unitatea de timp. De aici, sensibilitatea deosebită a acestuia la anxie.

Rezervele de oxigen ale organismului fiind modeste (750–800 ml O_2), asigură supraviețuirea în condiții anoxice în jurul a trei minute. Cât privește oxigenul fixat pe mioglobină, acesta satisface necesitățile metabolismului oxidativ doar câteva secunde.

8.7.2. DOZAREA GAZELOR RESPIRATORII

Intensitatea și eficiența schimburilor gazoase pulmonare și tisulare pot fi apreciate în funcție nu numai de valoarea testelor funcționale ventilatorii, ci și de conținutul în O_2 și CO_2 al sângelui și probelor de aer expirat.

Dozarea gazelor din sângele venos sau arterial se realizează fie volumetric, cu una din tehnicile clasice (Van Slyke sau Barcroft), fie cu ajutorul metodei oximetrice sau polarografice cu electrozi de platină sau sticlă, specifici determinării O_2 și CO_2 . În cazul metodei oximetrice, determinarea O_2 se poate realiza direct dintr-o mică cantitate de sânge sau indirect, cu ajutorul unei celule fotoelectrice fixate pe fața dorsală a lobului urechii. În funcție de intensitatea absorbției unui fascicul luminos de către oxihemoglobina, măsurările polarografice moderne permit determinări rapide și de mare precizie în funcție de presiunea parțială a O_2 și CO_2 din sânge. Pentru dozarea O_2 , de exemplu, se utilizează un electrod de platină imersat într-o soluție tampon prin care trece un curent electric slab (0,6 V). O membrană semipermeabilă separă proba de sânge de soluția tampon în care este imersat electrodul. Fluxul curentului electric fiind proporțional cu presiunea parțială a O_2 difuzat prin membrana semipermeabilă, reflectă concentrația acestuia în proba respectivă.

În cazul măsurării CO_2 , gazul difuzează prin membrana semipermeabilă a electrodului de sticlă, modificând pH-ul soluției tampon. Calibrarea și conversia pH-ului în volume de CO_2 permit stabilirea concentrației gazului respectiv.

Pentru dozarea gazelor din aerul expirat se utilizează fie una din metodele gazometrice clasice, folosind o soluție concentrată de KOH ca absorbant al CO_2 și o soluție de pirgalol care reține O_2 (metoda Haldane), fie una din tehnicile moderne bazate pe principiul termoconductibilității electrice a gazelor respiratorii (analizare de gaze tip Spirolit etc.).

Determinarea difuziunii pulmonare a gazelor se apreciază în funcție de măsurarea factorului de transfer alveolo-capilar utilizând monoxidul de carbon (CO) drept gaz test. Se poate folosi metoda respirației unice sau în regim stabil a amestecului gazos $CO + He$ (heliu).

Detaliile tehnice aparțin explorărilor funcționale respirației de specialitate.

Explorarea globală a schimburilor gazoase necesită determinarea atât a cantității de O_2 prelevate din sângele care perfuzează capilarele pulmonare din aerul inspirat, dublate de CO_2 extras din sânge și eliminat prin ventilație în mediul ambiant, cât și a presiunilor parțiale ale O_2 și CO_2 în sângele arterial. Ambii parametri trebuie determinați în condiții de repaus și, dacă este necesar, și de efort.

8.8. REGLAREA RESPIRAȚIEI

Schimburile gazoase între organism și aerul atmosferic asigură concentrația normală a oxigenului și bioxidului de carbon din sângele arterial, deși consumul primului și formarea celui de al doilea prezintă mari variații fiziologice. Faptul se datorează controlului și adaptării permanente a ventilației pulmonare la necesitățile variabile ale respirației prin modificarea frecvenței și amplitudinii respirației. Sistemul de monitorizare, reglare și control al funcției ventilatorii pulmonare are la bază participarea a trei principale componente:

- senzori care recepționează și transmit informații specifice (chimice, mecanice, termice) la centrul reglării;
- centri respiratori de integrare și elaborare a reacțiilor adaptative ventilatorii;
- efectori musculari, reprezentați de mușchii inspiratori și expiratori.

Elementele de bază ale sistemului de autoreglare și control al respirației sunt incluse în fig. 8.45. Ele constituie un sistem biocibernetetic autoreglat prin reacții de *feed-back* negativ și pozitiv, ce funcționează după principiul conexiunii inverse.

În ansamblu, factorii de reglare și adaptare a respirației la necesitățile variabile ale schimburilor gazoase sunt de două feluri – nervoși și umorali. Primii asigură activitatea ritmică ventilatorie și ajustarea ei pe cale reflexă sau voluntară, în funcție de concentrația gazelor sanguine, iar ceilalți întrețin excitabilitatea variabilă a centrilor respiratori.

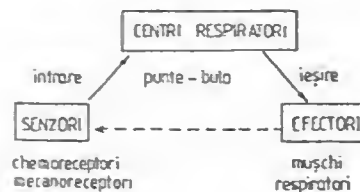


Fig. 8.45. Elementele de bază ale autoreglării respirației.

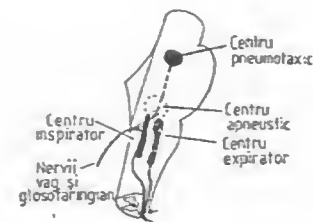


Fig. 8.46. Repartiția centrilor respiratori bulbo-protuberanțiali.

8.8.1. REGLAREA NERVOASĂ

Reglarea nervoasă se realizează cu participarea obligatorie a centrilor respiratori bulbo-pontini din formațiunea reticulată a trunchiului cerebral. Tehnicile uzuale de ablație, stimulare și întreținere a activității electrice neuronale din anumite zone ale trunchiului cerebral au evidențiat existența a două categorii de centri implicați în reglarea respirației. O primă categorie este reprezentată de centri respiratori intrinseci indispensabili funcției ventilatorii. Aceștia au sediul bulbar, în cazul centrilor inspiratori și expiratori propriu-ziși, și pontin, în cazul centrului pneumotaxic (fig. 8.46).

Cea de a doua categorie de centri o constituie centrul respiratori auxiliari, care, deși îndeplinesc alte funcții, influențează tonusul și activitatea ritmică a centrilor respiratori intrinseci. Din această a doua categorie fac parte centrul vasomotori bulbari, termoreglatori hipotalamici, modulatori din cerebel, precum și centrul volițional cortical. Cercetările experimentale privind organizarea funcțională a centrilor respiratori intrinseci au precizat că nu există un centru bine delimitat anatomic, ci populații neuronale interconectate funcțional. Frecvența diferită de descărcări ale potențialelor de acțiune din timpul inspirului și expirului la nivelul acestor complexe neuronale a determinat împărțirea lor în neuroni inspiratori și expiratori. Aceștia sunt situați bilateral în porțiunea dorsală a bulbului, în cazul centrilor inspiratori, și în partea lui ventrolaterală, în cazul centrilor expiratori.

Grupul neuronilor dorsali care intră în componența centrilor inspiratori se întinde de-a lungul formațiunii reticulate bulbare, cuprinzând și nucleul tractusului solitar, la nivelul căruia converg fibrele senzitive ale nervilor vag și glosofaringian. Prin intermediul acestora, centrul inspiratori primesc informații chemo- și mecanoreceptoare din plămâni și alte zone receptoare, cu rol reglator asupra tonusului și activității lor ritmice. Stimularea electrică a centrilor respiratori dorsali determină – prin intermediul căii bulbo-spinale – excitarea neuronilor motori ai frenicului și intercostalilor externi, urmată de contracția mușchilor respiratori. Ritmul bazal al respirației este, de altfel, generat de către grupul neuronilor dorsali. Funcționând ca veritabili oscilatori, aceștia continuă să emită descărcări ritmice și după secționarea atât supra- și subiacentă bulbară, cât și a nervilor care ajung la bulb.

S-a demonstrat, astfel, automatismul centrilor respiratori bulbari, infirmând conceptul mai vechi, după care activitatea ritmică a acestora ar fi întreținută de aferențele plecate de la nivelul zonelor reflexogene. Ritmul intrinsec al centrilor inspiratori are la bază apariția unor potențiale de acțiune de amplitudine crescândă, cu durată de câteva secunde, determinând producerea „în pantă sau rampă” a contracției mușchilor inspiratori (diafragm, intercostali externi etc.), urmată de încetarea descărcărilor și revenirea la tonusul inițial al musculaturii.

Descărcările „în pantă” pot fi întrerupte prematur de impulsurile inhibitoare sosite fie de la centrul pneumotaxic, fie de la nervii vag și glosofaringian prin nucleul tractusului solitar din imediata vecinătate a ariei inspiratorii.

Grupul neuronilor respiratori ventrali situat anterior și lateral celui dorsal face parte, de asemenea, din formațiunea reticulată bulbară, extinzându-se până la nivelul nucleilor ambiguu și retroambiguu. Funcțiile centrilor ventrali din bulb diferă însă de ale celor dorsali prin faptul că sunt inactivi în timpul respirației normale și intră în rezonanță cu centrul inspiratori dorsali numai când aceștia devin hiperactivi. Excitarea electrică a neuronilor ventrali produce în majoritatea cazurilor efortul de expirație, în timp ce unii prelungesc inspirul. În general predomină expirul asupra inspirului, mai ales în condițiile hiperventilației pulmonare. La producerea expirului participă și neuronii bulbo-spinali expiratori proiectați de nucleul retroambiguu spre motoneuronii mușchilor abdominali și intercostali interni.

Spre deosebire de centrul respiratori bulbari, a căror activitate fazică asigură producerea inspirației și expirației, centrul pneumotaxic din treimea superioară a punții deține un rol secundar, de limitare a duratei inspirului. Situat dorsal la nivelul nucleului parabrachial pontin, acesta descarcă impulsuri inhibitoare la nivelul centrului inspirator, determinând întreruperea inspirului. Printr-un astfel de mecanism, stimulii pneumotaxici puternici scurtează timpul de instalare „în pantă” a inspirului și cresc frecvența respiratorie.

Descărcările pneumotaxice slabe, din contră, cresc durata inspirului și scad ritmul respirator la câteva respirații pe minut. Efecte inverse, de alungire a inspirului, exercită centrul apneustic din treimea inferioară a punții. Stimularea acestuia provoacă fenomenul de apneuză (alungirea inspirației), întrerupt de scurte sforțări expiratorii (*gasps*) la animalul cu nervii vagi secționați și legăturile nervoase dintre centrul inspiratori bulbari și centrul pneumotaxic întrerupte. Prezența centrului apneustic nu este unanim admisă, apneuză fiind pusă de unii autori (Mounicastle, 1974) pe seama facilitării centrului inspirator de către sistemul reticulat activator.

În afara centrului pneumotaxic, limitarea inspirației este realizată și de către semnalele plecate de la nivelul plămânilor destinați maximal la sfârșitul inspirului. Distensia parenchimului pulmonar, activând receptorii de întindere, determină pe cale aferentă vagală încetarea inspirului și declanșarea expirului, denumit reflexul de inflație Hering-Breuer. Acest reflex reduce durata inspirului și crește frecvența respirației, ca și în cazul semnalelor emise de centrul pneumotaxic. La om, reflexul Hering-Breuer se produce numai când volumul ventilator curent depășește 1 litru. De aceea, el pare a fi mai curând un reflex de apărare și prevenire a distensiei pulmonare exagerate, decât un mijloc de autoreglare și control al ventilației.

La baza sa stau reacții cibernetice de sens invers, produse de distensia și colabarea plămânilor. În timp ce distensia plămânilor provoacă oprirea inspirului și declanșarea expirului (reflexul inhibitoinspirator), colabarea bruscă a țesutului pulmonar determină producerea inspirului (reflexul excitoinspirator). În comparație cu reflexul inhibitoinspirator, cel excitoinspirator este mai puțin important din punct de vedere fiziologic. Acesta din urmă acționează mai mult în condiții patologice de deflație pulmonară forțată (pneumotorax). În afara receptorilor de întindere, la oprirea inspirației și declanșarea expirației realizate de reflexul Hering-Breuer participă în oarecare măsură și receptorii juxtacapilari (receptori J) și de iritație (receptori I). Aceștia dețin un rol important în dispneea produsă de reacțiile inflamatorii locale, embolii, edemul pulmonar etc. Numeroase alte teritorii receptoare influențează pe cale neuro-reflexă ventilația pulmonară, începând cu zonele reflexogene – sino-carotidiană și endocardio-aortică – și sfârșind cu suprafețele exteroceptivă cutanată și proprioceptivă musculară. Creșterea presiunii sanguine, de exemplu, la nivelul vaselor mari de la baza inimii, reduce amplitudinea și frecvența respirațiilor, iar hipotensiunea determină reacții ventilatorii inverse. Excitarea receptorilor cutanați și căilor aeriene superioare provoacă, de asemenea, reacții neuro-reflexe respiratorii, predominant inhibitoare, înseși impulsurile aferente plecate de la nivelul receptorilor de întindere (fusuri neuro-musculare și corpusculi tendinoși Golgi) ai mușchilor inspiratori și expiratori pot modifica excitabilitatea reflexă a centrilor respiratori. Fusurile neuro-musculare având rolul de a compara contracția obținută cu cea comandată, excitarea lor mărește în cazul respirației forța de contracție a mușchilor intercostali prin intermediul centrilor respiratori. Un loc aparte în reglarea respirației dețin reflexele chemoreceptive. Acestea, fiind declanșate de modificări ale gazelor sanguine, vor fi prezentate după o scurtă trecere în revistă a factorilor umorali de autoreglare și control al funcției respiratorii.

8.8.2. REGLAREA UMORALĂ

Reglarea umorală asigură atât automatismul centrilor respiratori, cât și controlul activității ritmice a acestora. Principalii factori de autoreglare umorală a respirației sunt reprezentați de concentrația bioxidului de carbon, oxigenului și ionilor de hidrogen din sângele arterial. Aceștia acționează direct asupra ariilor chemosensibile ale centrilor respiratori și indirect, prin intermediul zonelor reflexogene periferice. Prin acțiunea directă, excesul de bioxid de carbon și ioni de hidrogen determină excitarea centrilor respiratori, activarea căilor nervoase aferente și intensificarea activității contractile a mușchilor inspiratori și expiratori, în vederea îndepărtării excesului creat cu ajutorul ventilației crescute. La rândul său, oxigenul influențează indirect reactivitatea centrilor respiratori. Scăderea acestuia în sângele arterial sub valorile normale excită chemoreceptorii zonelor reflexogene, activând transmiterea de semnale reglatoare la centrul respiratori.

8.8.2.1. Controlul chemoreceptor central

Efectul stimulant al bioxidului de carbon asupra centrilor respiratori a fost demonstrat de Frédérique (1902), prin tehnica circulației încrucișate, și confirmat de Heymans (1928) pe animale cu capul izolat, din punct de vedere vascular, de trunchi. Creșterea bioxidului de carbon în sângele de perfuzie a capului astfel izolat (cu legăturile nervoase dintre cap și trunchi păstrate) determină hiperventilație pulmonară, ca urmare a creșterii excitabilității centrilor respiratori. Efecte similare au fost constatate de către Haldane (1905) la om. Crescând concentrația bioxidului de carbon în aerul alveolar doar cu 0,2%, autorul sus-citat a obținut dublarea ventilației pulmonare. Efectele stimulante, producându-se și în cazul perfuzării ventriculului al IV-lea cu o soluție bogată în bioxid de carbon, pledeau pentru acțiunea directă a acestuia asupra centrilor respiratori. Pe aceste baze experimentale s-a atribuit bioxidului de carbon rolul de veritabil „hormon respirator” (fig. 8.47).

Aria chemosensibilă la variațiile bioxidului de carbon și hidrogen ionilor din sânge și lichidul cefalorahidian (LCR) este dispusă bilateral, la câțiva microni sub suprafața ventrală a bulbului. Excitarea ei intensifică atât ritmul de descărcare a impulsurilor generate de centrul inspiratori, cât și intensitatea acestora. La rândul lor, ionii de hidrogen reprezintă, de fapt, stimulul primar al neuronilor respiratori chemosensibili. Deși hidrogen ionii nu străbat cu ușurință bariera hemato-encefalică, în prezent se admite că efectele stimulante ale bioxidului de carbon sunt indirecte. Ele se realizează prin intermediul acidului carbonic format și disociaț în ioni de hidrogen și bicarboanat la nivelul ariei chemosensibile. Răspunsul puternic al acesteia la concentrația crescută a hidrogenilor din sânge sau LCR scade în orele și zilele următoare, datorită tamponării lor de către ionii de bicarboanat rezultând din disocierea acidului carbonic. De aceea, creșterea bioxidului de carbon în sânge are un puternic efect stimulant acut asupra respirației, urmat de efecte mai slabe ulterioare. Crescând frecvența și amplitudinea respirațiilor, bioxidul de carbon asigură mecanismul de *feed-back* necesar reglării concentrației sale normale în întregul organism. Astfel, centrul respiratorii fac oficiul „unui adevărat reostat al bioxidului de carbon”.

8.8.2.2. Controlul chemoreceptor periferic

În afara chemoreceptorilor centrali, un rol important în reglarea umorală a respirației revine zonelor chemosensibile periferice. Acestea transmit semnale centrilor respiratori pentru a ajusta reglarea ventilației la necesitățile variabile ale organismului în oxigen, bioxid de carbon și ioni de hidrogen. Chemoreceptorii periferici sunt prezenți în pereții arterelor mari din segmentul vascular de înaltă presiune, făcând oficiul de zone receptoare indispensabile atât reglării cardio-vasculare, cât și respiratorii (fig. 8.48). Este vorba de chemoreceptorii corpului carotidian și aortic, de la nivelul cărora impulsurile aferente ajung pe calea nervilor glosotaringian și vag la nucleul tractusului solitar și centrul inspiratorii bulbari.

Excitantul fiziologic al zonelor chemosensibile sino-carotidiană și endocardio-aortică este reprezentat de scăderea concentrației oxigenului din sângele arterial. Ritmul descărcărilor nervului carotidian crește considerabil când presiunea parțială a oxigenului arterial scade între 60 și 30 mmHg. Denervarea zonelor carotidiene abolește răspunsul hiperventilator produs de hipoxie și prelungește durata apneei voluntare. Pe această bază s-a sugerat că impulsurile plecate de la chemoreceptorii carotidieni contribuie la determinarea punctului de întrerupere a continuității (*breaking point*) și la reluarea impulsă a respirației oprite voluntar. Sensibilitatea la hipoxie a chemoreceptorilor periferici scade cu timpul, mai ales când stimulul hipoxic este cronic, ca în cazul adaptării la altitudine.

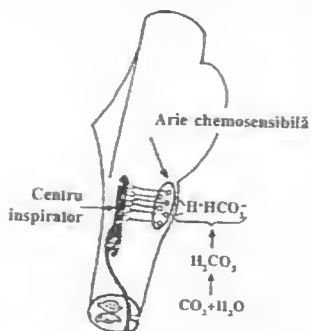


Fig. 8.47. Influența CO_2 asupra ariei chemosensibile respiratorii.

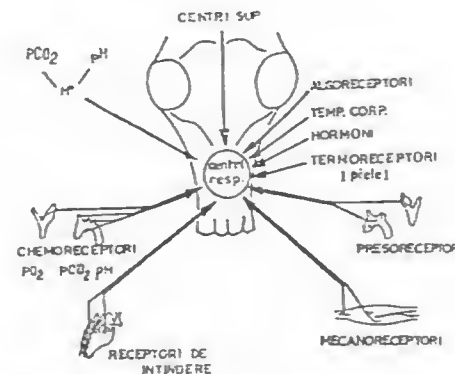


Fig. 8.48. Factorii neuro-umoral de reglare a respirației.

Chemoreceptorii sino-carotidieni și aortici sunt stimulați în mai mică măsură și de creșterea presiunii parțiale a bioxidului de carbon și ionilor de hidrogen, dublată de scăderea pH-ului sanguin. Mecanismul traducerii stimulilor chimici în potențiale de acțiune la nivelul chemoreceptorilor periferici nu este încă elucidat. La rândul său, răspunsul ventilator produs de scăderea pH-ului este greu de separat de cel cauzat de creșterea bioxidului de carbon.

În comparație cu reglarea centrală a respirației de către concentrația crescută a bioxidului de carbon și hidrogenilor din sânge, cea periferică dependentă de scăderea oxigenului arterial este mai puțin importantă în condiții normale. Ponderea sa crește în stările patologice de cauză respiratorie (pneumonie, emfizem etc.) datorită alterării schimburilor gazoase la nivel alveolo-capilar.

În timpul efortului fizic, utilizarea oxigenului și formarea bioxidului de carbon pot crește de 15-20 de ori. Ventilația pulmonară crește proporțional cu intensitatea proceselor metabolice, asigurând concentrația mai mult sau mai puțin constantă a oxigenului, bioxidului de carbon și hidrogenilor din sânge. Faptul se datorește stimulării centrilor respiratori de către reflexele chemoreceptive, pe de o parte, și de impulsurile plecate de la nivelul cortexului cerebral motor, pe de alta.

8.8.3. ALTE REFLEXE CARE AFECTEAZĂ RESPIRAȚIA

Deși excitarea oricărui nerv senzitiv produce modificări tranzitorii ale respirației, există anumite țesuturi bogate în receptori sensibili la stimuli mecanici, termici, chimici sau dureroși, a căror excitare determină reflexe respiratorii. Asemenea receptori se găsesc mai ales la nivelul căilor respiratorii, în vederea declanșării unor reflexe de apărare sau eliminare a agenților nocivi pătrunși în arborele traheobronșic.

Apneea reflexă, de diferite cauze și grade, constă în oprirea respirației, ca mijloc de apărare împotriva pătrunderii în plămân a diverselor substanțe gazoase, lichide sau solide. Apneea fiziologică de deglutiție, de exemplu, previne pătrunderea substanțelor ingerate în timpul faringian al deglutiției. Tipic este însă cazul apneei reflexe produse de inhalarea unor substanțe iritante ale mucoasei traheo-bronșice și însoțită de spasm glotic sau bronșic.

Strănuțul este, de asemenea, un reflex de apărare, declanșat prin excitarea receptorilor din căile respiratorii superioare. Impulsurile aferente pornite de la nivelul mucoasei rino-faringiene ajung la bulb pe calea trigemenului, determinând expulzia sub presiune a aerului blocat la nivelul vălului palatului și uvulei, în vederea îndepărtării corpului străin care a declanșat reflexul.

Tusea este un reflex de expir forțat după o inspirație profundă. Inspirul este urmat de apropierea corzilor vocale, închiderea glotei și contracția bruscă a mușchilor expiratori (intercostali interni, abdominali), însoțită de creșterea presiunii intratoracice cu peste 100 mmHg. Ca urmare, corzile vocale și epiglota se deschid, aerul este expulzat cu viteză mare, de până la 280 m/s, antrenând corpul străin din bronhiile sau traheea spre exterior.

Reflexul de tuse produs de iritația mecanică sau chimică a căilor respiratorii (laringe, trahee, bronhiile) este de o importanță fiziologică deosebită, deoarece duce la eliminarea agentului declanșator și la menținerea liberă a căilor aeriene spre alveolele pulmonare.

8.8.4. CONTROLUL VOLUNTAR AL RESPIRAȚIEI

În afara reglării reflexe bulbo-pontine, respirația este influențată de numeroase formațiuni nervoase supraiacente, care, acționând direct sau prin intermediul centrilor respiratori, integrează funcția respiratorie în cadrul diverselor activități comportamentale complexe. Dintre formațiunile suprapontine care participă la controlul și reglarea respirației fac parte hipotalamusul, sistemul limbic și îndeosebi scoarța cerebrală.

În cazul hipotalamusului, căile nervoase dintre acesta și centrii respiratori bulbo-pontini stau la baza integrării și participării funcției respiratorii la procesele de termoreglare. La animalele cu blană, de exemplu, lipsite de glande sudorale, supraîncălzirea determină binecunoscuta polipnee termică. Prin mecanisme hipotalamice similare se produc modificările respirației de efort și stările febrile la om.

Sistemul limbic implicat în stările afectiv-emoționale influențează, de asemenea, activitatea respiratorie în unele stări comportamentale. Frica și furia, de pildă, cresc ventilația, punând organismul în condiții mai bune de apărare sau fugă, iar emoțiile pozitive produc hiperpnee precedată de apnee de scurtă durată. Realizarea inspirurilor forțat și scurt din timpul adormirii este un alt exemplu de influențare a respirației de către nucleii olfactivi și sistemul limbic.

La rândul său, scoarța cerebrală și îndeosebi cortexul motor și premotor posedă capacitatea de a modifica voluntar respirația pe perioade scurte de timp. Atât apneea, cât și hiperpneea voluntară sunt limitate de apariția unor dereglări metabolice, care impun cu necesitate reluarea respirației. Hiperventilația voluntară poate continua până la instalarea alcalozei respiratorii și manifestărilor tetanice determinate de eliminarea excesivă a bioxidului de carbon. În cazul apneei voluntare, durata depinde de motivație, volumul pulmonar și tensiunea alveolară a gazelor la începutul apneei. Atingerea momentului când oprirea respirației nu mai poate continua (*breaking point*) este condiționată de presiunea parțială a bioxidului de carbon și oxigen din sânge. În general, reluarea respirației are loc când presiunea parțială a bioxidului de carbon crește la 50 mmHg, iar cea a oxigenului scade la 70 mmHg. Printr-o hiperventilație, prealabilă în oxigen pur, durata apneei voluntare poate fi prelungită de la 2–4 minute la 5–6 minute sau mai mult. La majoritatea subiecților apneea nu poate fi menținută până la starea de inconștiență.

Influențarea voluntară a stereotipului (*pattern*) respirator deține o importanță fundamentală în realizarea unor activități specifice umane, cum sunt vorbitul, cântatul vocal sau instrumental, în care respirația este controlată în mod predominant de scoarța cerebrală.

Vorbirea este posibilă datorită corzilor vocale prevăzute cu capacitatea de a vibra și emite sunete când sunt străbătute de un curent de aer sub presiune. Sunetele sunt apoi modulate și prelucrate cu ajutorul limbii și buzelor în camera de rezonanță buco-faringo-laringiană aparținând tractului supravocal. În cazul instrumentelor de suflat, anumite segmente ale acestora vibrează la trecerea coloanei de aer expirat. Presiunea subglotică, eficientă pentru a se putea vorbi sau cânta dintr-un instrument de suflat, rezultă din însumarea forțelor de retracție elastică a plămânilor și cuștii toracice, cu contracția activă a musculaturii expiratorii și relaxarea mușchilor inspiratori. Înregistrările electromiografice au precizat că în timpul vorbirii, la volume pulmonare mari, este mai activă musculatura inspiratorie și că, pe măsură ce acestea scad, crește activitatea electrică a mușchilor expiratori. Modificările respiratorii din timpul vorbirii sau cântatului constau din inspirații rapide, urmate de expirații prelungite și dublate de impulsuri nervoase care ajung la mușchii laringelui, faringelui, pereților bucali și feței în general. Pentru realizarea unor performanțe adecvate, toți mușchii care iau parte la actul vorbirii sau cântatului trebuie să se contracte într-un anumit timp, cu o anumită intensitate și într-o anumită secvență.

Aceasta presupune multiple integrări ce sunt realizate prin mecanisme de *feed-back*, cu participarea căilor nervoase: auditivă, proprioceptivă, tactilă etc., inclusiv ventilatorie. Elaborarea comenzilor reflexe și voluntare precis programate și secvențializate este rezultatul controlului și reglajului nervos cortico-subcortical. Întregind reglarea reflexă cu componenta voluntară, scoarța cerebrală face posibilă efectuarea unor acte comportamentale de mare complexitate în timpul și cu participarea determinantă a ventilației pulmonare. În felul acesta, respirația îndeplinește nu numai funcții vegetative (metabolice), ci și somatice (comportamentale).

8.8.5. ROLUL CĂILOR RESPIRATORII SUPERIOARE

La rândul lor, căile respiratorii superioare dețin un rol important în producerea apneelor din somn. Constituind calea comună a tractusurilor digestive, respirator și fonator, structura anatomică a acestuia este adaptată funcțiilor sale multiple. Segmentul faringian al căilor respiratorii superioare fiind colababil, realizează o coordonare complexă a activității musculare, buco-faringo-laringiene, care asigură rolul triplu (digestiv, respirator și fonator) al acestora. Echilibrul dinamic dintre presiunea hipofaringiană, ca forță de îngustare a faringelui, și activitatea mușchilor dilatatori ai acestuia (tensorul vălului palatului, genioglosul, genihioidianul, stiloglosul și cricoaritenoidianul posterior) este determinant în asigurarea permeabilității căilor respiratorii superioare și funcției ventilatorii. La acestea se adaugă activitatea mușchilor constrictori ai căilor aeriene superioare (ridicătorul vălului palatului, constrictorii faringelui, cricoaritenoidienii laterali, tiroaritenoidianul adductor al corzilor vocale), complianța regională, hipertrofiile adeno-amigdalene, anomaliile anatomice, precum și simpla trecere de la poziție ortostatică la cea de clinostatism nocturn.

Clapsul și obstruarea căii aeriene superioare din timpul somnului duc la instalarea hipoxemiei produse de apneele sau hipopneele obstructive. Acestea produc deteriorarea calității somnului, însoțită de o gamă variată de fenomene morbide asociate, al căror ansamblu constituie sindromul apneelor obstructive din somn (SAOS). Identificarea acestora necesită explorarea funcțională a ventilației pulmonare și a somnului cu ajutorul înregistrărilor simultane poligrafice (ventilatorii, EEG, EKG, EMG, EOG, oximetrice).

Studiile polisomnografice efectuate în ultimii 15 ani au precizat că există trei tipuri de apnee obstructive (periferice, centrale și mixte).

Apneele obstructive din timpul somnului sunt reprezentate de oprirea tranzitorie a fluxului aerian, cu persistența mișcărilor respiratorii toraco-abdominale. Fenomenele obstructive rezultate se manifestă sub formă de apnee sau hipopnee cu frecvențe și durate variabile. Apneele au fost definite ca fenomene de oprire a fluxului aerian, cu durata mai mare de 10 secunde. Hipopneele realizează reducerea cu 50% a mișcărilor respiratorii, cu durata de cel puțin 10 secunde, însoțite de scăderea saturației arteriale în O₂ cu minimum 4%. Numărul variabil de apnee din timpul unei ore de somn a impus introducerea noțiunii de indice de apnee sau hipopnee (IAH). Calculul acestuia se realizează după formula:

IAH = Numărul de apnee sau hipopnee/Durata somnului în minute × 60.

Astfel, s-a ajuns la definiția SAOS ca sindrom caracterizat de perioade de apnee sau hipopnee nocturne, însoțite de efort costo-diafragmatic, sforăit, hipoventilație pulmonară și desaturarea oxigenului arterial.

Apneele centrale se caracterizează prin absența simultană atât a fluxului aerian, cât și a mișcărilor respiratorii toracice și abdominale. În comparație cu apneele obstructive, acestea sunt mult mai rare, întâlnindu-se mai ales la vârstnici și nou-născuți. Ele se produc în timpul somnului profund cu unde lente (non-REM) și au la bază alterări ale sistemului nervos central de tip predominant metabolic (hipoxemie).

Apneele mixte rezultă dintr-o componentă centrală urmată de apnee obstructivă, sau invers. Succesiunea lor poate fi stabilită polisomnografic.

Polisomnografia este examenul de certitudine al SAOS, care pune în evidență anomaliile ventilatorii și reperкусиunile funcționale cardio-vasculare, musculare, hipoxemice etc. În afara manifestărilor nocturne, SAOS se însoțește de tulburări diurne de memorie, atenție, somnolență, tulburări cardio-vasculare.

8.9. REGLAREA BRONHOMOTRICITĂȚII

Spre deosebire de căile respiratorii traheo-bronșice prevăzute cu inele cartilaginose incomplete, bronhiolcele cu diametrul mai mic de 1,5 mm prezintă sub mucoasă un strat de fibre musculare netede, dispuse circular și acoperite de fibre elastice și de țesut conjunctiv adventiceal de susținere. Tonusul bazal al fibrelor musculare depinde de echilibrul realizat între factorii nervoși și umorali care tind să contracte sau să relaxeze musculatura bronșiolară. Aceasta se găsește sub controlul permanent al inervației simpatico-parasimpatice și mediatorilor respectivi, pe de o parte, și al aminelor biogene (histamină, serotonină), prostaglandinelor, leucotrienelor și al hormonilor locali și circulanți, pe de altă parte.

Reactivitatea căilor aeriene poate fi testată la om prin determinarea modificărilor de rezistență la flux produse de inspirul unor doze progresive de substanțe bronhoconstrictoare (acetilcolină, histamină, metacolină). Astmaticii, fiind hiperreactivi, reacționează prin creșterea rezistenței căilor aeriene la doze mai mici de astfel de substanțe decât subiecții normali, ca urmare a creșterii reactivității față de substanțele bronhoconstrictoare.

8.9.1. REGLAREA NERVOASĂ

Controlul nervos al bronhomotricității se realizează atât direct, cât și reflex, cu punct de plecare la nivelul receptorilor din mucoasa căilor aeriene, prin intermediul fibrelor eferente simpatică, parasimpatice, purinergice și peptidergice. Rolul principal în reglarea tonusului muscular bronșiolar revine inervației parasimpatice. Fibrele postganglionare simpatică inervează mai mult vasele pulmonare și glandele submucoase decât musculatura netedă bronșiolară propriu-zisă. Deși ponderea inervației simpatică a musculaturii bronșice la om nu este deplin stabilită, excitarea acesteia determină efecte bronhodilatatoare, cu participarea noradrenalinei ca substanță mediatoră. Aceasta stimulează alți receptori beta-adrenergici din musculatura bronșiolară, determinând bronhodilație, cât și alfa-receptorii adrenergici bronhoconstrictori. Receptorii beta-adrenergici bronhodilatori sunt sensibili mai ales la izoprenalină și adrenalina eliberată de glanda medulosuprarenală sau administrată exogen. Unele filete simpatică ajung numai până la nivelul ganglionilor parasimpatici, exercitând efecte modulatorie în sens inhibitor asupra căii eferente vagale postganglionare.

Contrar simpaticului, prevăzut cu proprietăți predominant dilatatoare, stimularea fibrelor parasimpatice provoacă o puternică bronhoconstricție, prin intermediul acetilcolinei, ca mediator chimic. Eliberarea acesteia este potențată de serotonină și inhibată de noradrenalină și prostaglandina E_2 . Administrarea de substanțe blocante ale receptorilor M-colinergici (muscarinici), cum este atropina, din contră, relaxează bronhiolcele, îndepărtând obstrucția căilor aeriene inferioare de natură colinergică.

În ultimii ani s-au pus în evidență, la nivelul musculaturii netede bronșiolare, filete nervoase noradrenergice și noncolinergice, denumite purinergice, de tipul celor prezente la nivel gastro-intestinal (Burnstock, 1982). Excitarea acestora relaxează musculatura bronșică contractată, folosind ca mediator chimic ATP sau adenzina rezultată din degradarea AMP cu ajutorul nucleotidazei. Schema inervației eferente a căilor aeriene este prezentată în fig. 8.49.

Deși mecanismul de producere a efectelor bronhodilatatoare ale fibrelor purinergice la om este insuficient cunoscut, alterarea acestora pare a fi unul din factorii cauzali ai creșterii reactivității căilor aeriene la astmatici. Problema este desigur mai complexă, întrucât

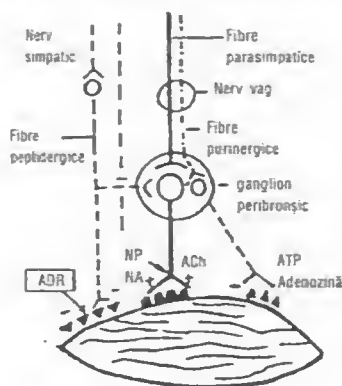


Fig. 8.49. Inervația eferentă a musculaturii bronșice.

conținutul în autoanticorpi circulanți specifici alfa-receptorilor adrenergici crește în detrimentul celor anti-beta-adrenergici, la bolnavi cu astm bronșic (Fraser și colab., 1984).

Prezența celulelor argirofile aparținând sistemului APUD la nivelul căilor aeriene, secretoare de substanță P, VIP, bombezină și enkefaline (Cutz și colab., 1981) ridică și problema unei componente nervoase peptidergice locale, în afara celei purinergice modulatorie.

În timp ce substanța P și neurokinina sunt puternic bronhoconstrictoare și stimulatorie ale secreției traheo-bronșice prin mecanismul eliberării de acetilcolină, VIP și enkefalinele modulează în sens inhibitor efectele stimulării colinergice vagale.

Reglarea neuro-reflexă a tonusului musculaturii bronșice se produce predominant pe cale vagală, ca urmare a excitației receptorilor din submucoasa căilor aeriene și transmiterii aferente a impulsurilor nociceptive la nucleul dorsal al vagului (fig. 8.50).

Iritația căilor respiratorii provocată de diverși poluanți determină reflexul de tuse și bronhoconstricție printr-un astfel de mecanism, eliberator de acetilcolină de la nivelul fibrelor eferente vagale.

8.9.2. REGLAREA UMORALĂ

Reglarea umorală a bronhomotricității este, ca și cea nervoasă, sub influența a două categorii de factori, bronhoconstrictori și bronhodilatori. Dintre factorii umorali bronhodilatori fac parte în primul rând catecolaminele circulante. În timp ce noradrenalina provine în proporție de până la 90% din terminațiile nervilor simpatici, adrenalina este secretată de țesutul glandular medulosuprarenal. Acționând mai mult asupra beta-receptorilor adrenergici, catecolaminele produc bronhodilație și inhibarea secreției de substanțe bronhoconstrictoare de la nivelul mastocitelor, cum sunt histamina, prostaglandinele $F_{2\alpha}$ și leucotrienele.

Prin acest mecanism, descărcările simpatico-adrenergice din timpul efortului fizic relaxează musculatura netedă a bronhiolcelor, asigurând ventilația unor volume crescute de aer. La nivel celular, catecolaminele activează, prin intermediul receptorilor beta-adrenergici, adenilat ciclaza membranară și sinteza de cAMP, prevăzută cu proprietăți miorelaxante și bronhodilatatoare.

La rândul său, cAMP este inactivat de către fosfodiesterază, asupra căreia acționează în sens inhibitor teofilina și eufilina. Inhibând inactivarea cAMP de către fosfodiesterază, acestea determină ameliorarea crizelor de astm prin mecanismul acumulării cAMP.

Din substanțele bronhoconstrictoare fac parte histamina, serotonină, SRSA, bradikinină, unele prostaglandine și leucotriene, tromboxanii și factorul de agregare plachetară (PAF). Histamina și serotonină sunt eliberate de la nivelul mastocitelor, mai ales în timpul reacțiilor alergice aerogene produse de unele antigene sau substanțe iritante.

SRSA (*slow reactive substance of anaphylaxis*) este un amestec de leucotriene (LTC_4 , LTD_4 , LTE_4) bronhoconstrictoare. Acestea rezultă, împreună cu lipoxinele, din degradarea acidului arahidonic membranar de către 5- și, respectiv, 15-lipoxigenaza. Din același precursor comun prezent în fosfolipidele membranare se formează, sub influența ciclooxigenazei, prostaglandinele A, E, D și $F_{2\alpha}$, prostacilinele și tromboxanii. Toți acești produși de metabolizare ai acizilor grași polinesaturați, de tipul acidului arahidonic sau prostanoic, acționează asupra tonusului muscular bronșiolar, determinând bronhoconstricție sau bronhodilație.

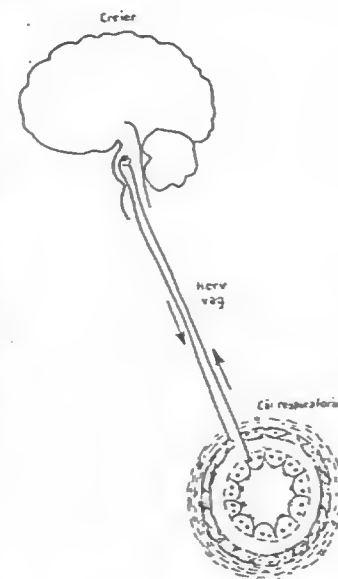


Fig. 8.50. Influența stimulării neuroreflexe vagale asupra bronhomotricității.

Astfel, în timp ce leucotrienele, tromboxanii și prostaglandinele D și $F_{2\alpha}$ sunt bronhoconstrictoare, prostacilinele și prostaglandinele A și E sunt bronhodilatatoare. Concomitent cu influențarea bronhomotricității, o parte din metabolismul lipidic contribuie, prin acțiunea capilarodilatatoare, la producerea exsudatului inflamator și la alterarea activității plachetare. La rândul lor, lipoxinele par implicate în inhibarea activității celulelor *killer*, iar PAF secretat de bazofile, neutrofile și eozinofile participă atât la realizarea bronhoconstricției, cât și a reacției inflamatorii locale.

În general, factorii reglării umorale acționează sinergic cu cei nervoși, prelungind în timp și intensitate proprietățile bronhodilatatoare sau constrictoare ale acestora. Astfel, tonusul bronhomotor este rezultatul interacțiunii unui complex de factori neuro-umoral sistemici și locali. Efectele lor cumulative sau antagonice depind de reactivitatea musculaturii bronșice, densitatea receptorilor specifici și natura excitanților direcți sau reflecși ai căilor aeriene, începând cu substanțele iritante și sfârșind cu diversele alergene, ca factori de agresiune mastocitară și eliberare a substanțelor mediatore locale. Deficiul de receptori beta-adrenergici, de exemplu, a fost incriminat de unii autori (Szentivanyi, 1968) drept principala cauză a spasmului bronșic la astmatici. Odată cu descoperirea prostaglandinelor, leucotrienelor și lipoxinelor în căile aeriene, s-a constatat că problema bronhomotricității normale și patologice este complexă și prezintă încă suficiente necunoscute.

8.10. FUNCȚIILE NERESPIRATORII ALE PLĂMÂNULUI

Plămânul reprezintă cea mai întinsă membrană biologică datorită suprafeței mari a alveolelor pulmonare, de aproximativ 100–125 m². Mult timp, el a fost considerat ca organ exclusiv respirator. Prin poziția sa de interfață între mediul extern și cel intern, prin bogăția de vase sanguine aparținând circulației sistemice și nutritive, precum și prin diversitatea structurilor celulare, plămânii îndeplinesc o serie de funcții independente de cele respiratorii. Funcțiile nerespiratorii ale plămânilor pot fi grupate în trei mari categorii:

- funcția antitoxică;
- funcția metabolică;
- funcții accesorii de rezervor sanguin, filtru, control volemic etc.

8.10.1. FUNCȚIA ANTITOXICĂ

Plămânul constituie nu numai o barieră împotriva pătrunderii în organism a diverselor substanțe și particule, ci și un organ prin care se pot realiza atât debarasarea de substanțe nocive, cât și introducerea în organism a unor substanțe farmacodinamice. Astfel, funcția antitoxică a plămânului se realizează prin următoarele procese:

- de apărare împotriva agresiunilor aerogene;
- de epurare a substanțelor volatile din sânge;
- de absorbție a plămânului.

Apărarea împotriva agresiunilor aerogene constituie un mecanism de protecție alveolară împotriva unor substanțe particulare, ca: pulberi inerte, agenți microbieni, substanțe antigenice, gaze toxice etc. Protecția alveolară se realizează prin mijloace nespecifice și specifice.

Mijloacele nespecifice de protecție sunt reprezentate prin mecanisme fizice de filtrare și epurare, dublate de mecanisme biochimice.

Mecanisme fizice. Particulele solide pătrunse odată cu aerul inspirat suferă un proces de filtrare aerodinamică, în urma căruia sunt depuse la nivelul mucoaselor nazo-faringiene și traheo-bronșice. În nazo-faringe sunt reținute particulele mai mari de 10 μm, iar cele de 3–10 μm realizează un impact cu mucoasa traheo-bronșică, depunându-se pe aceasta.

Particulele de 1–3 μm pot depăși bariera traheo-bronșică și ajung în alveole, unde se vor depune prin sedimentare.

De la nivelul celor trei segmente – nazo-faringian, traheo-bronșic și alveolar – particulele vor fi eliminate printr-un mecanism de epurare, reprezentat de *sistemul de transport ciliar*, întregii de *sistemul mecanic de transport bronhiolo-alveolar*.

Sistemul de transport ciliar este format din aparatul muco-ciliar, numit elevatorul muco-ciliar, datorită rolului său de îndepărtare a particulelor depuse la suprafața mucoasei. Aceasta conține două tipuri de celule secretoare de mucus: celulele epiteliale mucoase și seroase. Secreția lor este bogată în glicoproteine, lizozim și imunoglobuline. La aceasta se adaugă secreția glandelor submucoase. La rândul lor, celulele epiteliale ciliate sunt cele mai numeroase celule ale epiteliului bronșic. Fiecare celulă este formată dintr-un corp bazal și un mare număr de cili ancorați în citoplasma celulară. Deplasarea lor într-o singură direcție se datorește contracției filamentelor microtubulare sub influența energiei furnizate de hidroliza ATP. Mișcarea cililor cu direcția dinspre interior spre exterior face ca mucusul de la suprafața căilor respiratorii să fie îndreptat spre exterior. Viteza de transport a particulelor este de 10–20 mm/min, astfel încât într-o oră se elimină 90% din substanțe.

Tusea și strănutul împreună cu activitatea muco-ciliară asigură o parte din evacuare pe cale aeriană și o parte pe cale digestivă, prin deglutiția secrețiilor.

Sistemul mecanic de transport bronhiolo-alveolar realizează epurarea particulelor sedimentate în alveole și este format din *surfactant* și *macrofaag alveolar*. Surfactantul este pelicula tensioactivă secretată de pneumocitele de tip II ce acoperă suprafața alveolară, cu rol antiatelectazic protector și de transport. El este format din fosfolipide tensioactive, având ca principal constituent 1,2-dipalmitoil lecitina. Datorită mobilității sale la suprafața peliculei de lichid alveolar, surfactantul este antrenat împreună cu particulele depuse spre exterior.

O parte din particulele depuse în alveole sunt captate de macrofagele alveolare, celule libere în număr de 2–3 la 10 alveole, cu rol de fagocitare și epurare a particulelor. Epurarea poate fi interstițială (intraparenchimatoasă) sau externă, prin mușcări ameboide ale macrofaagului spre orificiul bronșic. Majoritatea macrofaagelor ajung în căile aeriene de eliminare, fiind înlocuite de noi celule, un număr oarecare revenind în parenchimul pulmonar. Epurarea bronhiolo-alveolară este lentă în comparație cu cea realizată de sistemul de transport expectorant la nivel traheo-bronșic, durând de la câteva zile până la câteva săptămâni.

Eficiența funcției de apărare este evidențiată de faptul că numărul bacteriilor în aerul expirat este mult mai mic decât în cel inspirat.

Mecanisme biochimice. În secrețiile bronșice și în surfactant există compuși biochimici cu acțiune asupra particulelor microbiene. Unii compuși, precum lizozimul și esterazele, acționează ca enzime de suprafață. Alții, ca enzimele lizozomale, transferinele bacteriene, α_1 -antitripsina, kaliceina și interferonul au efect inhibitor asupra dezvoltării florei microbiene. Existența interferonului conferă posibilitatea unei acțiuni exercitate de către macrofage asupra virusurilor inhalate.

În afara prelucrării metabolice nespecifice intrafagocitare, cu ajutorul hidrolazelor lizozomale în macrofaag alveolar, asupra florei microbiene acționează și factorii imunitari reprezentați de anticorpii neutralizanți sintetizați de celulele imunocompetente ale mucoasei bronșice. La distrugerea antigenului concurează trei linii succesive de anticorpi: mucoasă, submucoasă și intravasculară. Imunoglobulinele de secreție, deși sunt de tip IgA, se diferențiază de cele serice, având o configurație deosebită. La nivelul submucoasei predomină imunoglobulinele: IgG și IgM specifice.

În cazul unor agresiuni repetate asupra plămânului, blocajul exercitat de acesta în fața particulelor aerogene crește progresiv și în paralel cu capacitatea de epurare și fagocitare.

În agresiunile aerogene, mărimea și structura chimică a particulelor prezintă importanță mai mare decât densitatea acestora. Aerul inspirat conține aproximativ 20 000 de bacterii pe m³ și plămânul luptă împotriva acestora atât prin mijloace comune de epurare a particulelor, cât și prin mijloace speciale antimicrobiene, de apărare specifică și nespecifică.

Celelalte substanțe străine din aerul inspirat sunt metabolizate de către celulele Clara (celule epiteliale bronșiale neciliate).

Epurarea substanțelor volatile din sânge este posibilă datorită faptului că membrana alveolo-capilară este permeabilă pentru acestea. În clinică, halena respiratorie este unul din semnele caracteristice ale acidocetoziei diabetice (miros acetonc), în coma hepatică (miros caracteristic dat de metilmercaptan) sau mirosul de amoniac din coma uremică.

Alcoolul se elimină prin plămâni și respirație, fapt folosit în medicina legală ca test al alcoolemiei la șoferi. Unii solvenți organici, ca eterul, acetona, oxidul de azot, administrați parenteral sau aplicați pe piele, se elimină prin respirație. În clinică, capacitatea de eliminare a substanțelor volatile prin plămâni se poate folosi în tehnicile de determinare a vitezei circulației sanguine, a debitului cardiac și a volumului pulmonar prin injectarea intravenoasă de eter.

Absorbția la nivelul plămânului se realizează prin procesul de difuziune. S-a demonstrat că introducerea intratraheală de manitol sau insulină face ca aceasta să ajungă în sânge de 24 de ori mai repede decât prin membrana intestinală. De asemenea, drogurile liposolubile străbat membrana alveolo-capilară de 40 de ori mai rapid ca pe cea intestinală și de încă două ori mai repede dacă administrarea se face sub formă de aerosoli. În terapeutică se folosește curent această cale de administrare a unor medicamente aerosolizate.

8.10.2. FUNCȚIA METABOLICĂ

Pe plan metabolic, plămânul este implicat atât în metabolismele glucidic, protidic și lipidic, cât și în metabolizarea unor hormoni și mediatori chimici cu deosebită importanță fiziologică și fiziopatologică.

În metabolismul glucidic, implicațiile plămânului au fost dovedite experimental prin determinarea consumului de glucoză pe preparate de celule izolate de plămân și prin dozarea arterio-venoasă a concentrației lactaților și piruvaților la intrarea și ieșirea din plămân. S-a stabilit că, deși plămânul reprezintă doar 2% din greutatea corporală, utilizează 4% din consumul total de glucoză al organismului. Acest consum mare se explică în parte prin aceea că macrofagul alveolar folosește energia rezultată din fosforilarea oxidativă, spre deosebire de celelalte macrofage, care utilizează glicoliza anaerobă.

În metabolismul lipidic, plămânul intervine prin trei procese: lipopexie, lipoliză și lipogeneză.

Lipopexia pulmonară este realizată prin filtrarea și reținerea în plămân de chilomicroni absorbiți în intestin. Se pare că aceștia sunt extrași din circulația venoasă pulmonară, unde au ajuns pe cale limfatică de la intestin. La câine, 35–48% din chilomicronii nu se găsesc nici în ficat, nici în țesutul adipos, ceea ce dovedește că au fost reținuți de către alte organe.

Lipoliza se produce în parenchimul pulmonar prin beta-oxidarea acizilor grași, producerea de radicali acetati și furnizarea unei mari cantități de energie folosită în procesul de lipogeneză. Lipoliza este mai crescută în perioadele postprandiale și poate fi inhibată prin derivați ai fenotiazinei.

Lipogeneza pulmonară constă în sinteza de fosfolipide la nivelul pneumocitelor bogate în mitocondrii. Sinteza de fosfolipide este posibilă prin consumul de acizi grași proveniți din alimentație și care, supuși beta-oxidării, furnizează energia necesară. Fosfolipidele intră în compoziția surfactanului, a cărui importanță a fost menționată, și care necesită a fi continuu înlocuit, deoarece se degradează rapid și este în cea mai mare parte eliminat pe cale muco-ciliară sau reabsorbit de celulele suprafeței alveolare. Ca substanțe biologice active de natură lipidică, plămânul sintetizează din acidul arahidonic al fosfolipidelor membranare mari cantități de prostaglandine, mai ales de tip E_1 , E_2 și $F_2\alpha$, prevăzute cu acțiuni locale asupra musculaturii bronșice și circulației pulmonare.

Injectarea intravenoasă de prostaglandină $F_2\alpha$ la animal produce bronhoconstricție și creșterea rezistenței căilor aeriene, iar cea de prostaglandină E_2 și mai ales de E_1 produce bronhodilatație, chiar în condițiile administrării de histamină, serotonină sau ale excitației vagului, cu acțiuni puternic bronhoconstrictoare. Relaxarea bronșioară este de zeci de ori mai eficientă dacă administrarea prostaglandinelor se face sub formă de aerosoli. Bronhodilatația prostaglandinică nu se exercită prin receptori beta-adrenergici, deoarece nu este inhibată de propranolol. Și la om s-a constatat bronhoconstricție după inhalarea de prostaglandină $F_2\alpha$ și bronhodilatație urmată de creșterea VEMS la astmatici după administrare de prostaglandine E sub formă de aerosoli.

În afara prostaglandinelor, plămânii sintetizează prostaciline, tromboxani și leucotriene. În timp ce tromboxanii sunt agreganți plachetari și bronhoconstrictori, prostacilinele sunt antiagregante și bronhodilatatoare moderate. La rândul lor, leucotrienele sunt puternic bronhoconstrictoare, SRSA eliberat în anafilaxie este un amestec de leucotriene C_4 , D_4 și E_4 . Ca și ficatul, plămânul este și loc de inactivare a lipidelor biologice active.

În metabolismul protidic, rolul plămânului se evidențiază prin posibilitatea de a sintetiza proteine. Prin utilizarea de aminoacizi marcați s-a observat stocarea în cantitate mare a acestora în plămân. S-a stabilit, printre

alte, că la nivelul plămânului se găsesc celule specializate care sintetizează substanțe proteice complexe cu activitate biologică mare. În favoarea implicațiilor plămânului în metabolismul proteic pledează și bogăția de enzime de la acest nivel. Astfel, după țesutul cerebral, plămânul este cea mai bogată sursă de tromboplastină. Mari cantități de enzime proteolitice, de tipul kaliceinei și enzimei de conversie, se găsesc în plămâni.

Unele peptide vasoactive, ca angiotensina I sau bradikina, sunt metabolizate cu ocazia traversării plămânului. Perfuzarea plămânului cu o soluție de angiotensină I, de exemplu, determină apariția de angiotensină II, pe lângă alți produși de degradare în lichidul colectat. Din soluția de perfuzie ce conține serotonină, noradrenalină, histamină și bradikinină, plămânul reține aproape în totalitate această ultimă substanță. Perfuzarea plămânului de piscă cu o soluție ce conține bradikinină a demonstrat că la o singură trecere a soluției prin plămân, 80% din acest polipeptid este captat și inactivat. Enzima de conversie a angiotensinei I în angiotensină II face și oficiul de factor inactivant al bradikininei. Hipoxia acută scade activitatea enzimei respective, cu consecințe vasculare locale și generale. Creșterea spectaculară a enzimei de conversie imediat după naștere asigură creșterea presiunii în circulația pulmonară și deschiderea canalului arterial.

Totodată, evidențiindu-se o activitate locală întinsă a dopa decarboxilazei, se admite că în plămân se sintetizează și o oarecare cantitate de catecolamine. Pe de altă parte, prezența monoaminoxidazei, enzimă de degradare a adrenalinei și serotoninei, demonstrează că plămânul este un organ în care procesele de sinteză sunt întregite de importante procese de degradare.

8.10.3. FUNCȚIILE ACCESORII ALE PLĂMÂNULUI

Aceste funcții au rolul de a menține homeostazia organismului, deoarece prin plămân, în timp de câteva minute, trece întreaga cantitate de sânge a organismului.

Funcția de rezervor de sânge este asigurată de bogăția imensă a capilarelor circulației funcționale, plămânul conținând în condiții de repaus 10–12% din volumul total de sânge. Acesta suferă mari variații în raport cu distensibilitatea sistemului arterio-venos, controlată de substanțele vasoactive locale și generale.

Funcția de filtru al circulației pulmonare este îndeplinită prin capacitatea de a reține din circulație, pe lângă elemente figurate normale, și produși ca: hematii și leucocite aglutinate, coaguli de fibrină și grăsimi, mici emboli patologici sau celule tumorale.

După creștere și reținere, aceste particule sunt distruse de enzimele proteolitice conținute în cantitate mare de plămân.

Funcția de control al presiunii sanguine pulmonare este realizată fie prin echilibrul dinamic dintre inactivarea bradikininei, cu efect hipotensor, fie prin transformarea angiotensinei I în angiotensină II, cu efect puternic vasopresor, de către enzima de conversie care posedă și proprietăți bradikinazice.

Plămânul participă și la menținerea fluidității sângelui, atât prin capacitatea sa de rezolvare a cheagurilor sub acțiunea plasminei, rezultată din activarea plasminogenului, cât și prin sintetizarea unor mari cantități de heparină.

Funcția de reglare a balanței hidroelectrolitice: plămânul elimină prin respirație mari cantități de apă și căldură, suplinind la animalele lipsite de glande sudoripare secreția sudorală. Polipneea termică, de exemplu, este cunoscută la câine. Odată cu apa se elimină și mari cantități de electroliți, iar prin cei 15–30 osmoli de bioxid de carbon eliminați în 24 de ore participă, alături de organele de excreție, la menținerea constantă a reacției ușor alcaline a mediului intern.

8.11. FENOMENELE AUSCULTATORII PULMONARE

Mișcarea aerului prin sistemul de conducte aerifere produce în anumite condiții zgomote specifice. Cunoașterea atât a caracteristicilor normale ale acestora, cât și modificările pe care le comportă în cadrul diferitelor circumstanțe patologice sunt indispensabile pentru diagnosticarea afecțiunilor aparatului respirator. Trecerea aerului prin tubulatură bronșică, în timpul mișcărilor respiratorii, produce zgomote numai la

modificările bruște de calibrul. Aparatul respirator poate fi reprezentat ca un tub care are două puncte în care se creează aceste condiții. La nivelul orificiului glotic are loc prima micșorare bruscă a diametrului conductei aeriene, urmată de o lărgire evidentă (traheea). Aici se produce zgomotul glotic, sau laringo-traheal. La nivelul bronhielor supralobulare se găsește o a doua stricătură, urmată de o creștere a calibrului tubului respirator (lobulul cu alveole pulmonare), unde se ascultă murmurul vezicular. Mecanismul celor două zgomote respiratorii s-a probat și experimental. Astfel, secționarea traheei la un animal de experiență, sub cartilajul cricoid, determină dispariția primului zgomot, cu menținerea murmurului vezicular.

Dimpotrivă, păstrarea zgomotului laringo-traheal și dispariția murmurului vezicular apar după secționarea bilaterală a vagului, care produce o paralizie a sfincterului bronhielor supralobulare și în condițiile păstrării intacte a traheei.

Între aceste două puncte nu se mai creează situații care să favorizeze apariția de zgomote respiratorii, bifurcația, urmată de diminuarea calibrului bronhielor realizându-se în mod progresiv și uniform.

Zgomotul laringo-traheal se percepe anterior, în dreptul sternului, mai aproape de trahee, iar, pe fața posterioară a toracelui, în spațiul interscapulo-vertebral, mai aproape de linia mediană (coloana vertebrală). Durata și intensitatea acestui zgomot sunt mai accentuate în expir, dar tonalitatea sa este mai ridicată în timpul inspirului.

Acest zgomot diminuează progresiv, pe măsură ce auscultația se face mai departe de focarul maxim, fiind înlocuit treptat cu murmurul vezicular. Procesele patologice de condensare pulmonară pot amplifica acest zgomot, auscultația sa fiind posibilă în aceste situații și în zona corespunzătoare parenchimului.

Murmurul vezicular generat în zona bronhielor supralobulare este prezent dacă alveolele pulmonare și bronhiiolele sunt permeabile. Se ascultă în ambele faze ale respirației, pe întreaga suprafață pulmonară, cu durată mai mare în timpul inspirului, deoarece numai în prima parte a expirului există zgomot respirator.

Cea mai importantă manifestare expiratorie este însă fonația.

8.12. FONAȚIA

Manifestările fonatorii sunt consecința vibrației corzilor vocale la trecerea aerului expirat sub presiune prin glota închisă. Semnalul acustic produs în timpul vorbirii sau cântatului este caracterizat prin doi parametri variabili, reprezentați de înălțimea sunetului și de structura lui fonetică, cu mecanisme de producere și localizare diferite. În timp ce mecanismul care realizează emisia și înălțimea sunetelor, denumit fonație, este localizat la nivelul laringelui, mecanismul care determină structura fonetică a sunetelor asigură articularea acestora în cavitatea orală cu rezonanță nazo-faringiană.

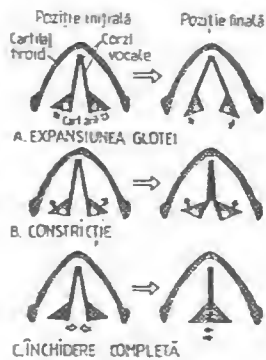


Fig. 8.51. Expansiunea și închiderea glotei.

Laringele ca organ vibrator are o structură complexă, adaptată funcției respiratorii, pe de o parte, și fonatorii, pe de alta. Componenta vibratoare este reprezentată de corzile vocale, alcătuite din mușchii tiroaritenoidieni, țesut membranos și ligamentul vocal, dispuse între cartilajul tiroid, anterior, și cartilajele aritenoidice, posterior, având la bază cartilajul cricoid.

Cartilajele aritenoidice, fiind situate în partea superioară a marginii posterioare a cartilajului cricoidian, se pot roti în jurul propriei lor axe, apropiindu-se sau îndepărtându-se unul față de altul.

Poziția și controlul gradului de întindere a corzilor vocale sunt realizate de către mușchii laringelui. Rolul acestora este de a ajusta deschiderea glotei și tensiunea corzilor vocale.

Astfel, contracția mușchilor cricoaritenoidieni posteriori, trăgând îndărăt cartilajele aritenoidice, îndepărtează corzile vocale, expansionându-

le. La rândul său, mușchiul aritenoid transvers apropiă cartilajele aritenoidice, favorizând vibrația lor în timpul expirului. În schimb, contracția mușchilor cricoaritenoidieni laterali, tracționând cartilajele aritenoidice înainte și lateral, asigură respirația normală (fig. 8.51).

Tensiunea corzilor vocale este reglată de mușchii cricoidieni și elementele musculare ale acestora (mușchii vocali). Contracția lor controlează forma groasă sau subțire a corzilor vocale și diferitele tipuri de fonație. Mucoasa laringelui are rol de protecție, asigurând umezirea și purificarea aerului inspirat. Inervația este de origine vagală, fiind asigurată din punct de vedere senzitiv de nervul laringian superior, iar din punct de vedere motor de către laringeul inferior, ram al nervului recurent.

Mecanismul fonației. Prima etapă în realizarea emisiei de sunete, vorbirii sau cântatului o reprezintă pregătirea pentru expir. În această primă etapă, glota este închisă sau ușor întredeschisă. În consecință, presiunea subglotică crește progresiv, ca urmare a micșorării volumului cutiei toracice din timpul expirului. Valorile acestei presiuni sunt în mod normal de 4-6 cmH₂O, dar pot să ajungă până la 20 cmH₂O sau chiar mai mult, determinând împingerea laterală a corzilor vocale. Ca urmare, aerul trece prin glota strâmtorată spre cavitatea nazo-faringiană, cu o viteză mult mai mare decât la nivelul traheei, determinând vibrațiile corzilor vocale.

Fluxul rapid al aerului creează un vacuum parțial între corzile vocale, din cauza fenomenului Bernoulli, care, ducând la scăderea presiunii, reînchide glota și procesul de oscilație a corzilor reîncepe, odată cu creșterea presiunii subglotice. Întreruperea curentului de aer cu frecvența ritmului oscilațiilor determină frecvența sunetului emis.

Numărul închiderilor și deschiderilor glotei pe unitatea de timp, adică frecvența fundamentală a sunetului, depinde atât de tensionarea corzilor vocale, cât și de presiunea subglotică. Ambii parametri pot fi modificați de către musculatura laringelui și toracelui. Astfel, cu cât tensiunea la nivelul corzilor vocale (ori presiunea subglotică) este mai mare, cu atât frecvența sunetului produs va fi mai înaltă și, în consecință, frecvența sunetului emis în timpul vorbirii sau al cântatului poate fi modificată voluntar. La rândul lor, particularitățile anatomice, individuale (de exemplu, lungimea corzilor vocale) determină variații în comportamentul oscilator, făcând posibilă clasificarea vocilor în bas, tenor, alto și soprană.

Producerea și menținerea aceluiași ton implică coordonarea extrem de fină a activității mușchilor care participă la realizarea sa.

Un rol deosebit îl au, în această situație, atât proprioceptorii de la nivelul mușchilor și mucoasei laringiene, cât și mecanismele de *feed-back* auditiv. Modificarea intensității tonului, cu menținerea constantă a frecvenței, poate avea loc numai prin relaxarea mușchilor cricoidieni. Această relaxare este obligatorie pentru a compensa creșterea presiunii subglotice și a antrena o ușoară modificare de frecvență. Astfel de modificări au fost evidențiate prin înregistrări electromiografice din mușchii respectivi.

Importanța mecanismului de *feed-back* auditiv este evidențiată în situațiile de surditate congenitală, când vorbirea nu poate fi învățată.

În cazul vorbirii în șoaptă, corzile vocale nu oscilează. Ele se mențin lipite una de alta, lăsând doar o mică deschidere triunghiulară în zona cartilajelor aritenoidice. Trecerea aerului prin această porțiune intercartilajinoasă a fantei glotice produce un zgomot care poate fi folosit pentru articulare și astfel se produce vocea șoptită.

Articularea sunetelor. În laringe, producându-se sunete nearticulate, vocea articulată se obține prin modificarea acestora la nivelul cavității bucale, al faringelui și al cavităților nazale. Trei organe principale participă la articularea sunetelor. Acestea sunt: buzele, limba și palatul moale.

După ce iese din glotă, aerul străbate cavitățile: faringiană, bucală și nazală. În timpul vorbirii, aceste regiuni suferă o serie de modificări care contribuie la realizarea sunetelor articulate.

Astfel, nazo-faringele și părțile adiacente, putând fi separate de oro-faringe prin valul palatin, modifică configurația cavității bucale atât prin schimbarea poziției limbii și obrazilor, cât și prin participarea musculaturii de la nivelul palatului moale. La rândul său, limba poate realiza un perete despărțitor, creând două compartimente la nivelul cavității bucale.

Spațiile tractului vocal au o frecvență naturală, proprie, dependentă de configurația lor momentană. Când frecvențele naturale ajung în tractul vocal de rezonanță, se produce o amplificare deasupra intensității prag, astfel încât ele devin auzibile. Rezonanțorii sunt reprezentați de gură, nas, sinusurile nazale asociate,

faringe și chiar de cavitatea toracică. Fiecare din aceștia poate avea configurații diferite, oferind tractului vocal posibilitatea să realizeze frecvențe naturale variabile. Calitatea vocii articulate depinde de aceea a rezonatorilor.

Pentru fiecare articulare, există o poziție particulară a pomeților, limbii, vălului palatin, specifică benzii de frecvență și, astfel, sunetul articulat se aude în momentul când cavitățile devin rezonante. Benzile de frecvență caracteristice diferitelor poziții se numesc tonuri. Ele depind numai de configurația tractului vocal și nu de sunetele produse de laringe.

Fenomenul de rezonanță reprezintă factorul esențial în articularea sunetelor. Acest lucru poate fi dovedit experimental prin înlocuirea aerului cu heliu. În aceste condiții, proprietățile rezonatoare ale tractului vocal sunt alterate, vorbirea devine de neînțeles și chiar oscilațiile corzilor vocale nu mai sunt variabile.

Numeroase alte condiții normale și patologice pot altera fonația și vorbirea articulată. Acestea pot fi obiectivate cu ajutorul tehnicilor electro-fiziologice de explorare a fonației, de tipul electrologografiei, care constă în înregistrarea oscilografică simultană a cuvintelor și vibrațiilor corzilor vocale. În timp ce oscilografia cuvintelor înregistrate magnetic (fonogramă) oferă indicații asupra amplitudinii, frecvenței, timbrului și duratei sunetelor, glotografia întregeste tabloul informațiilor oferite de electrologografie cu date asupra mișcărilor corzilor vocale. Astfel se pot obiectiva diversele tipuri de disartrii (neurologice, psihiatrice etc.), evoluția lor și eventualul beneficiu terapeutic.

9. FIZIOLOGIA APARATULUI DIGESTIV

9.1. ALIMENTAȚIA

Alimentația, factor fundamental de mediu. Alimentele constituie principala sursă de energie indispensabilă diverselor forme de activitate vitală.

Viața nu poate fi concepută fără necesitatea încorporării substanțelor nutritive, pe seama cărora se desfășoară procesele vitale. Asimilarea și dezasimilarea continuă, prin transformarea și metabolizarea substanțelor nutritive, oferă materiei vii atât energia necesară întreținerii vieții în condiții de repans și efort, cât și elementele materiale necesare refacerii structurilor celulare uzate.

Ca factor fundamental de mediu, alimentația este știința relațiilor biologico-medicale dintre produsele alimentare și om, în toată complexitatea lor.

Socotită de unii autori ca cel mai important factor de mediu, alimentația are o influență considerabilă asupra organismului, influență care, cel mai frecvent, nu-și dezvăluie efectele întotdeauna imediat, ci cumulativ în timp.

Prin conținutul în trofine (principii alimentare), produsele nutritive îndeplinesc un rol plastic, energetic și funcțional.

Între trofinele absorbite din tubul digestiv și cele plasmatic, ca și între acestea și cele tisulare, există un echilibru dinamic.

Pentru realizarea unui bilanț echilibrat, între ceea ce omul metabolizează și pierde și ceea ce el primește din mediul ambiant, este necesară o condiție de bază, și anume, ca rația alimentară să conțină toate trofinele esențiale și în cantitate suficientă.

Când mediul îi oferă un aport alimentar optim, organismul poate constitui depozite importante pentru unele trofine (lipide, vitamine hidrosolubile etc.) sau mai puțin importante (glucide, elemente minerale, mai puțin sigur proteine).

Numeroase experimente și observații din ultimele decenii au infirmat teoria *self-selecției*, după care omul reușește să se alimenteze fiziologic (adecvat). Studii aprofundate au demonstrat că, la animal, capacitatea de discriminare între produsele alimentare incomplete în trofine sau chiar nocive și cele utile se instalează progresiv și prin comparații, un rol determinant jucându-l proprietățile organoleptice ale produselor alimentare. Astfel, dacă șobolanilor li se oferă diferite alimente separat, ei își alcătuiesc un regim echilibrat, în concordanță cu necesitățile. Mai mult, șobolanii cu tulburări endocrine experimentale își selectează alimentele în sensul captării elementului care lipsește (animalele suprarenalectomizate aleg alimentele ce conțin multă sare, iar cele paratiroidectomizate pe cele bogate în calciu). La om nu s-a putut pune în evidență un astfel de mecanism. Dimpotrivă, criteriile subiective (gust, aromă etc.) pot face ca libera alegere a produselor alimentare să nu fie corespunzătoare necesarului nutritiv, iar mecanismul realizator al selecției să fie altul decât nevoia metabolică; de aceea, rația alimentară stabilită pe baze științifice devine net superioară celei lăsate la libera alegere a individului.

Mai mult decât atât, alimentația fiziologică, ca știință, caută nu numai să apere organismul de efectele unui aport alimentar neadecvat, ci îi menține și crește vigoarea, performanța fizică și intelectuală, fertilitatea, longevitatea, capacitatea de reacție și adaptare.

9.1.1. NECESARUL CALORIC AL ORGANISMULUI

Atât condițiile de mediu, cât și reacțiile adaptative ale organismului la solicitări impun un necesar energetic care variază în limite largi, de la individ la individ, și chiar la același subiect, în funcție de particularitățile genetice și de starea fiziologică momentană.

Metabolismul, din punct de vedere termodinamic, se desfășoară pe baza unei relații cantitative, în care sunt implicate patru variabile: travaliul (L), pierderea de căldură (C_p), depozitarea de energie (E_d) și aportul exogen (A_e). În acest caz, $A_e = L + C_p + E_d$.

Dacă aportul exogen depășește suma travaliului și pierderii de căldură, excesul se depozitează. Dimpotrivă, în cazul în care aportul exogen este inferior sumei travaliului și pierderii de căldură, organismul va apela la rezervele de creștere depozitate, micșorându-le.

În condiții de veghe, neutralitate termică (îmbrăcat 22°C și dezbrăcat $28^\circ\text{--}30^\circ\text{C}$), repaus fizic și psihic, nevoile energetice bazale sunt de 1 kcal/kg corp și oră, ceea ce pentru un adult de 70 kg corespunde la 1 680 kcal/24 de ore.

Raportate la suprafața corporală, acestea vor varia între 36 și 55 kcal/m² și oră, în funcție de sex și vârstă.

La acest necesar bazal se adaugă 250–350 kcal/24 de ore pentru necesitățile igienei zilnice, 300–400 kcal/24 de ore pentru deplasarea în afara locuinței și 75–400 kcal/oră pentru diferite solicitări fizice. La valoarea consumului energetic se mai adaugă acțiunea dinamic specifică a alimentelor (ADS), care reprezintă energia consumată în timpul digestiei și asimilării hranei și care variază în funcție de factorul nutritiv utilizat, fiind mai mică în cazul lipidelor și glucidelor (+4)–(+6) și mai mare în cazul proteinelor (+30%), în medie +10%. Necesarul energetic de activitate este la sexul feminin, în general, cu aproximativ 10–15% mai mic decât la bărbați. Activitatea desfășurată în cursul procesului productiv de 8 ore va adăuga încă un minimum de 500 kcal pentru activitate de birou. Aceasta va duce la 2 400–2 500 kcal/24 de ore necesare vieții sedentare a adultului.

Dacă subiectul efectuează o muncă fizică, necesitățile energetice vor crește proporțional cu intensitatea acesteia. Astfel:

– munca fizică ușoară:	50 – 90 kcal/oră sau 400 – 700 kcal/8 ore
– munca fizică moderată:	100 – 150 kcal/oră sau 700 – 1 000 kcal/8 ore
– munca fizică grea:	150 kcal/oră sau de la 1 100 kcal/8 ore în sus.

În funcție de intensitatea efortului, nevoile calorice cresc până la 4 500–5 000 kcal în condițiile efortului greu, sau chiar până la 6 000 kcal/24 de ore în efortul istovitor. Având în vedere că este greu să se țină seama de multitudinea de factori care influențează metabolismul energetic din 24 de ore, precum și faptul că populațiile sunt formate din grupe cu particularități fiziologice și de efort diferite, FAO (Organizația pentru alimentație și agricultură) a stabilit no „tip de referință” mediu ce este reprezentat de un subiect, de 25 de ani, cu greutatea corporală de 65 kg, trăind într-un climat cu temperatură medie anuală de 10°C și 8 ore de muncă, fără efort fizic obositor. Necesitățile în calorii pentru acest standard sunt de 3 000 kcal (2 700 kcal pentru femeie).

Aceste nevoi scad cu vârsta, astfel: 3% pentru fiecare deceniu până la 45 de ani, 7,5% între 45–65 de ani, iar între 65–75 de ani cu 10%. Peste această vârstă nu mai este indicată micșorarea aportului caloric. Pentru copii, necesitățile calorice sunt diferențiate, de asemenea, pe grupe de vârstă, astfel:

– sugarii 0–1 ani:	110–80 kcal/kg corp/zi (descrescător de la trimestrul I la trimestrul IV);
– copii între 1–3 ani:	80–90 kcal/kg corp/zi;
– copii între 4–6 ani:	70–80 kcal/kg corp/zi;
– copii între 7–12 ani:	60–70 kcal/kg corp/zi;
– adolescenți 13–19 ani:	55–60 kcal/kg corp/zi la băieți și 50–55 kcal/kg corp/zi la fete.

Indiferent de particularitățile satisfacerii necesarului variabil de energie, alimentația trebuie să asigure un aport minim al celor șapte grupe de alimente: glucide, lipide, proteine, vitamine, minerale, apă și celuloză.

Necesarul de glucide al organismului. Ingestia de glucide este legată direct de rolul lor ca sursă energetică la care organismul apelează în primul rând. Glucidele constituie sursa principală energetică a țesutului nervos și muscular (1 g = 4,1 kcal).

Glucidele reprezintă sursa de bază a realizării ciclului citric și, în același timp, exercită o acțiune proteinoprotectoare (de cruțare a proteinelor), având în vedere că, în prezența glucidelor, organismul nu apelează la structurile proteice în scop energetic.

Un minimum de glucide este necesar în vederea degradării normale a lipidelor; în absența acestora lanțul metabolic lipidic este viciat și apare acidoza prin corpi cetonici și incomplet oxidăți.

Necesarul glucidic minim este de 100 g/24 de ore.

În mod normal ele trebuie să asigure 60–65% din valoarea calorică a rației alimentare. În acest fel, alimentația unui adult va conține glucide în cantitate de 6 g/kg greutate corporală/24 de ore, ceea ce înseamnă 380–400 g/24 de ore.

Aportul de glucide care depășește frecvent valoarea de 70% din totalul caloric al rației alimentare suprasolicită pancreasul, ducând la epuizarea sa funcțională în ceea ce privește secreția de insulină.

Nevoile de glucide pot varia cu vârsta și starea fiziologică a organismului: la copii necesarul este de 300–500 g/zi, la persoanele în vârstă de 200–300 g/zi, iar în raport cu efortul fizic cerințele pot ajunge la solicitare intensă, până la 500 g/zi.

Glucidele alimenter sunt de origine vegetală (cereale, paste făinoase, cartofi, pâine, fructe) și animală (lapte, ficat, carne etc.).

În același timp, glucidele se pot prezenta în alimeotație sub formă de polizaharide (de exemplu, făinoase) sau sub formă rafinată, solubilă, cu moleculă mică: glucoză, zaharoză, levuloză etc. (de exemplu, produsele zaharoase).

Este important ca zaharurile solubile să nu depășească raportul de 1/4 din rația totală de glucide sau 7–10% din valoarea calorică totală a rației, având în vedere aportul lor caloric important, ca și absorbția rapidă și în cantitate mare (adevărat stres glicemic) ce suprasolicită mecanismele neuro-endocrine de reglare și control al glicemiei.

În cazul lipsei din alimeotație a glucidelor, rezervele organismului fiind foarte reduse (370 g echivalând cu 1 500 kcal), 80–87% din trebuințele energetice minime (1 500–1 700 kcal/24 de ore) sunt acoperite prin lipide din rezervele organismului, a căror oxidare se face în acest caz incomplet.

Alimentația exagerată cu glucide poate duce, pe de o parte, la carența de vitamina B₁, întrucât metabolizarea glucidelor necesită această vitamină, iar, pe de altă parte, aportul excesiv de făinoase, prin conținutul bogat în fitină, poate spolia organismul de calciu (formare de fitați de calciu insolubili, ce se elimină prin excrețiile organismului). Între necesarul glucidic și lipidic trebuie păstrat raportul de 4/1, de importanță deosebită pentru realizarea rezistenței organismului față de diverse noxe chimice (funcția antitoxică a ficatului).

Necesarul de lipide al organismului. Aportul de lipide este important atât pe plan energetic, cât și plastic, precum și ca sursă de acizi grași esențiali (linolenic, linoleic și arahidonic) și de vitamine liposolubile. În condițiile efortului fizic intens, lipidele reprezintă furnizorul ideal de energie prin marea lor valoare calorică (1 g lipide generează 9,1 cal).

Lipidele din organism pot proveni atât din sursă exogenă alimentară, cât și prin sinteza proprie din glucide și proteine.

Aportul normal de lipide poate varia între limitele de 15–35% din aportul caloric total pe zi, sau de la 30 la 110 g/zi pentru o rație de 3 000 kcal/zi, adică în medie 1 g/kg greutate corporală în 24 de ore.

Introduse în organism, lipidele pot lua următoarele căi: catabolizare, transformare în glucide sau acizi aminați, reinnoirea lipidelor de constituție, depunere sub formă de rezerve mobilizabile.

O importanță particulară o prezintă aportul de acizi grași esențiali, care sunt indispensabili desfășurării proceselor metabolice și care ou pot fi sintetizați de organism în măsura nevoilor pentru menținerea creșterii și troficității.

Ei sunt implicați în formarea moleculelor de lipide complexe, esterificarea colesterolului, în formarea membranelor celulare, în reacțiile de oxido-reducere, în formarea unor enzime, în funcția tiroidiană etc.

Lipidele de origine exogenă au valori nutritive diferite, atât în ceea ce privește conținutul în acizi grași esențiali, cât și raportul dintre acizii grași saturați și nesaturați.

Astfel, grăsimile animale, cu excepția uleiurilor de pește și mamifere acvatice, sunt în general mai sărace în acizi grași esențiali decât cele vegetale (floarea-soarelui, soia, arahide).

Pentru utilizarea normală a grăsimilor se recomandă ca raportul dintre acizii grași nesaturați și acizii grași saturați să fie la paritate sau supraunitar, ceea ce, de fapt, se realizează când cel puțin 1/3 din rația de lipide este reprezentată prin uleiuri vegetale bogate în acizi grași esențiali (formula propusă de Keys: 1/3 acizi grași saturați + 1/3 acizi grași nesaturați + 1/3 acizi grași polinesaturați).

Insuficiența de lipide în alimentație duce la apariția unor manifestări nespecifice de denutriție generală (emaciere) și la tulburări de termoreglare.

Excluderea lipidelor din alimentație oprește creșterea, predispune la necroze distale, emaciere, leziuni renale și moarte timpurie.

Creșterea aportului de lipide peste limita maximă determină ca efecte imediate micșorarea randamentului la efortul fizic, apariția fenomenelor de oboseală și intensificarea acidozei din cursul activității musculare intense; în cazul ingestiei crescute de lipide timp îndelungat, apar efectele hipercolesterolemiant și aterogene. Variațiile aportului în funcție de vârstă trebuie să țină seama de faptul că la copii necesarul de lipide este mai crescut, aproximativ 2–3 g/kg/zi (nevoi mai mari de acizi grași esențiali), iar la cei vârstnici, de scăderea ingestiei (odată cu reducerea proceselor metabolice și cheltuielilor energetice) până la 0,6–0,9 g/kg/zi.

În condiții de efort fizic intens sau de temperatură scăzută (ambele cazuri mărind cheltuiala de energie), proporția de calorii furnizate de lipide poate ajunge până la 35% din totalul caloric zilnic.

Alături de necesarul lipidic propriu-zis se situează și aportul unor factori lipotropi, cum este colina, ale cărei surse principale sunt metionina, betaina și lecitina.

Acțiunea acestor factori constă în formarea complexelor fosfolipidice cu rol permisiv în sinteza și degradarea lipidelor, lipsa lor ducând la încălcarea grăasă a ficatului.

Necesarul de proteine al organismului. Proteinele constituie suportul structural al țesuturilor (20%), sinteza proteică fiind factorul fundamental al vieții. Ele intră, de asemenea, în constituirea anticorpilor, hemoglobinei, enzimelor și hormonilor.

Un individ adult pierde prin catabolizare 70 g proteine/zi.

Necesarul proteic acoperă nevoile atât energetice, cât și plastice ale organismului.

Sub aspect energetic, acesta este important în măsura în care proteinele sunt metabolizate pe cale glucidică, cu eliberarea în același timp de grupuri aminice, inactivate de ficat prin funcția ureopoietică. Utilizarea proteinelor ca substrat energetic are loc numai în cazul în care aportul de glucide este foarte redus.

Proteinele reprezentând suportul structural al vieții, rolul esențial al acestora este cel plastic.

În acest cadru se realizează reînnoirea continuă a structurilor proteice celulare degradate, a proteinelor pierdute prin secrețiile glandulare exocrine și endocrine, descumarea epitelială, distrugerea de celule sanguine, reacții imunitare etc.

Necesarul proteic îmbracă un aspect cantitativ și calitativ.

Necesarul cantitativ. Echilibrul dinamic dintre aport și utilizare se apreciază pe baza bilanțului azotat (diferența dintre azotul ingerat și cel eliminat prin excreție sau pierdere – transpirație, descumare etc.). Nevoile cantitative de proteine se exprimă în nevoia de azot minim teoretic și este egală cu 0,30–0,35 g/kg/24 de ore; nevoia de azot minim de întreținere, definită ca aport minim proteic necesar menținerii echilibrului bilanțului azotat în limite fiziologice, este egală cu 1 g/kg/24 de ore; nevoia de azot optim fiziologic, cu ajutorul căreia individul răspunde în bune condiții la diferite grade de solicitare în activitatea fizică și la diverse stări de mediu ambiant, este egală cu 1,4 g/kg/24 de ore (100 g/24 de ore) sau 12,5% din rația calorică totală zilnică.

Pierderile de compuși azotați prin transpirație sunt infime, iar prin fecale pierderea este constantă, de 1,2 g/zi, indiferent de aportul proteic. Aceasta atrage atenția asupra importanței variațiilor eliminării de azot pe cale renală.

În condiții de sănătate și solicitări obișnuite ale organismului, bilanțul azotat este echilibrat la adulți. La organisme în creștere sau în convalescență, bilanțul este în favoarea aportului azotat, iar la organisme în suprasolicitare, bilanțul este în favoarea eliminării azotului.

Necesarul calitativ. Valoarea nutritivă a proteinelor nu constă doar în aportul cantitativ, ci și în cel calitativ al proteinelor, oglindit în conținutul de aminoacizi esențiali.

Aminoacizii, componente fundamentale ale proteinelor, sunt clasificați în neesențiali (sintetizabili în organism) și esențiali (nesintetizabili în organism). Aportul proteic trebuie să acopere în primul rând necesarul de aminoacizi esențiali, cu aceeași obligativitate ca cea pentru asigurarea cantității de acizi grași esențiali, vitamine și oligoelemente. Deficitul sau lipsa lor va determina tulburări de creștere și dezvoltare la copii și în refacere la adulți. Cei 10 aminoacizi esențiali sunt: treonina, arginina, histidina, valina, leucina, izoleucina, lizina, metionina, fenilalanina și triptofanul, fiecare cu rol metabolic și funcțional distinct. Astfel, treonina și izoleucina favorizează absorbția la nivel intestinal a altor aminoacizi, valina asigură menținerea funcționalității ficatului, testiculului, timusului și suprarenalelor, iar metionina este necesară creșterii și dezvoltării, fiind singura sursă de grupări metil în organism și, totodată, factor lipotrop. La rândul său, lizina contribuie la creșterea osoasă și la menținerea funcțiilor genitale feminine, fenilalanina asigură metabolismul tirozinei, noradrenalinei și adrenalinei, în timp ce triptofanul, prin metabolii săi, întreține formarea de compuși chinurenici, pigmenți și serotonină.

Aminoacizii arginină și histidină sunt, de asemenea, necesari organismului uman, sintetizându-se în cantități mici, în condițiile unui exces de acizi aminați esențiali. Histidina este precursorul histaminei și, totodată, participă la sinteza hemoglobinei și acizilor nucleici, iar arginina are rol esențial în urogeneză și în sinteza proteinelor plasmatic. Aminoacizii esențiali găsindu-se în carne în proporție apropiată celei din organismul uman, aportul proteic trebuie să asigure suficiente proteine de origine animală (40%).

Unele proteine aduc un aport sărac în aminoacizi. Astfel, zeina (proteina din porumb) nu conține lizină și triptofan, gelatina este lipsită de tirozină și triptofan, ceea ce face ca aceste proteine să fie considerate incomplete. La stabilirea regimurilor alimentare se vor avea, deci, în vedere proporțiile optime ale tuturor aminoacizilor esențiali din alimente, disponibilitatea lor simultană, în funcție de gradul de digerabilitate a proteinelor ingerate.

În acest sens, proteinele alimentare au fost împărțite în trei clase, în funcție de conținutul în acizi aminați. Astfel, în clasa I intră proteinele ce conțin toți acizii aminați esențiali și în proporții optime (proteine de origine animală: ovotubulina, ovalbumina, globulina, cazcina etc.); din clasa a II-a fac parte proteinele ce conțin toți acizii aminați esențiali, dar nu în proporție corespunzătoare, 1–3 găsindu-se în cantități mai reduse, fapt ce limitează (factori limitanți) utilizarea celorlalți (glutamina și gliadina din cereale, legumelina din leguminoase uscate etc.); clasa a III-a este constituită din proteine în care 1–2 aminoacizi esențiali, mai ales de tipul triptofan, lizină, absentează (zeina, gelatina).

Valoarea biologică a proteinelor din clasa I este dată și de procentul înalt de azot reținut, net mai bun pentru proteinele animale decât pentru cele vegetale; de aceea, raportul dintre proteinele animale și vegetale trebuie să fie corespunzător, adică minimum 35% (de preferat 40–50%) din proteine să provină din proteine de origine animală.

Factorii care influențează necesarul plastic pot fi grupați, ca și la necesarul energetic, în: a) factori externi reprezentați de solicitările fizice și aport și b) factori interni, reprezentați de vârstă și sex.

Solicitarea fizică influențează bilanțul azotat numai în măsura în care devine epuizantă, consumtivă. Nici efortul intelectual nu reclamă un aport proteic crescut, decât în cazul suprasolicităților (oboseală, surmenaj). S-a remarcat că reducerea orelor de somn, ca și mobilizarea maselor musculare negativează bilanțul azotat, solicitând un aport proteic crescut. În astfel de cazuri, acesta poate atinge 1,5–2 g pe kg corp/zi. Și aportul energetic al alimentației influențează bilanțul azotat, antrenând, în cazul insuficienței, creșterea eliminării azotate. Adăugarea unui aport crescut de glucide și lipide ameliorează rapid echilibrul azotat.

Diferite boli cresc necesarul proteic al organismului, fie prin intensificarea metabolismului și pierderile de materiale azotate proprii (sânge, limfă etc.), fie datorită tulburărilor de digestie proteică. Procesele inflamatorii care însoțesc afecțiunile acute sau cronice, solicitând reacții nespecifice sau specifice imunitare, intensifică, de asemenea, pierderile azotate.

Sexul influențează numai în anumite perioade bilanțul azotat: menstruație, sarcină, lactație. În aceste perioade, pierderile și, deci, necesarul devin mai mari, reclamând o creștere uneori substanțială a nevoilor proteice. Astfel, în menstruație se consideră necesar un aport între 1,5–3,3 g proteine/kg și zi, în sarcină 2 g proteine/kg corp și zi, iar în timpul alăptării 2–2,2 g proteine/kg corp și zi.

Vârsta influențează bilanțul proteic în perioadele de creștere și dezvoltare. Dacă pentru adultul de 70 kg, în condițiile unor solicitări obișnuite, este necesar 1 g/kg corp și zi, în perioadele de creștere nevoile proteice sunt mult mai mari: 4–6 g/kg și zi la nou-născutul imatur, 3 g la sugar, 2 g la copil între 1–15 ani, 1,5 g la pubertate.

La bătrâni, cantitatea de proteine necesare este, de asemenea, crescută, 1,5 g/kg corp și zi, întrucât dificultățile de masticatie creează anorexie și preferință pentru alimentele glucidice moi. Un factor esențial al aportului proteic corespunzător îl reprezintă și asigurarea cantităților normale de vitamine și minerale absorbite.

9.1.2. NECESARUL DE VITAMINE AL ORGANISMULUI

Vitaminele fac parte din categoria biocatalizatorilor stimulanți ai reacțiilor anabolice și morfogenetice indispensabile creșterii, dezvoltării și funcțiilor normale ale diverselor țesuturi și organe. Ne fiind sintetizate de organismul uman decât în puține cazuri, aportul insuficient sau lipsa acestora din alimentație provoacă manifestări carentiale generatoare de perturbări metabolice, morfologice și funcționale de diferite grade. Atât hipovitaminozele, cât și avitaminozele se însoțesc de tulburări trofice de creștere sau degenerativă întregite de deficite funcționale specifice carenței respective.

În general, sinteza vitaminelor hidrosolubile (vitaminele B₁, B₂, B₆ și B₁₂, niacina, biotina, acidul pantotenic, acidul folic, colina, vitamina C) și liposolubile (vitaminele A, D, E și K) se realizează de către regnul vegetal sau de microorganisme. Plantele verzi și fructele lor reprezintă sursa principală de vitamine ca atare sau de precursori ai acestora.

Vitaminele, prin participarea lor la catabolism ca biocatalizatori, stimulează reacțiile de oxidare, anabolice și morfogenetice, intrând alături de enzime și hormoni în grupa de substanțe active.

Vitaminele liposolubile A, D, K și E presupun prezența grăsimilor, pentru a fi vehiculate, și a sărurilor biliare, pentru asigurarea absorbției.

Vitaminele hidrosolubile – complexul B, vitamina PP, vitamina H, acidul pantotenic, acidul folic, vitamina C – participă, în general, în structura coenzimelor implicate în reacțiile catalitice de oxido-reducere eliberatoare de energie sau în sintezele asimilatoare.

Rolul fiziologic al vitaminelor și necesarul zilnic sunt prezentate în tabelul 9.1.

Necesarul de minerale al organismului. Un important rol funcțional este asigurat în alimentație de către minerale (sodiul, potasiul, calciul, fosforul, magneziul) care intră în compoziția tuturor structurilor și umorilor organismului, ca și în majoritatea reacțiilor catalitice, al căror aport și bilanț echilibrat sunt indispensabile desfășurării proceselor metabolice.

TABELUL 9.1

Rolul fiziologic al vitaminelor și necesarul zilnic

Vitamine	Rol fiziologic	Necesar zilnic
<i>Vitamine liposolubile</i>		
Vitamina A	<ul style="list-style-type: none"> - menținerea troficității epitelilor în creștere; - procesul vederii (formarea retinului); - funcția de reproducere (dezvoltarea și funcția ovarului, fertilitatea, potența sexuală, mobilitatea spermatozozilor) 	Adult: 5 000 U.I., din care 1/3 caroten Pubertate, adolescență, graviditate: 6 000 U.I.
Vitamina D	<ul style="list-style-type: none"> - stimularea absorbției intestinale a calciului și indirect a fosforului; - stimularea fosforilării oxidative; - transformarea fosforului organic în fosfor anorganic; - creșterea eliminării de calciu 	Adult: 400-600 U.I. Sarcină, lactație: 600-800 U.I.

TABELUL 9.1 (continuare)

Vitamine	Rol fiziologic	Necesar zilnic
Vitamina K	<ul style="list-style-type: none"> - în prezența vitaminei K se elaborează protrombina, proconvertina, factorul antihemofilic B și factorul Stuart; - participă în lanțul respirator ca un catalizator redox 	Adult: 0.1 mg Nou-născut: 19 ng Sugar: 1 ng
Vitamina E	<ul style="list-style-type: none"> - acționează asupra lobului anterior al hipofizei (eliberare de hormoni gonadotropi, elaborare de progesteron, hormoni androgeni); - acțiune antioxidantă; - favorizează sinteza fosfocreatinei; - crește rezistența pereților capilari 	Adult: 220 mg
<i>Vitamine hidrosolubile</i>		
Vitamina B ₁ (Tiamina)	<ul style="list-style-type: none"> - acționează sub formă de coenzimă în metabolismul glucidic; - intervine în transformarea glucidelor în lipide și în activarea lipazei pancreatice; - intervine în metabolismul apei; - are rol în transmiterea influxului nervos; - are efect permissiv colinergic; - menține tonusul vascular și permeabilitatea; - participă în sistemele enzimatice inactivatoare ale hormonilor estrogeni 	0,6 mg pentru fiecare 1 000 cal ingerate
Vitamina B ₂ (Riboflavina)	<ul style="list-style-type: none"> - intră în componența flavin enzimelor transportoare de hidrogen (enzime redox); - rol în mecanismul vederii (retină); - rol în sinteza acidului clorhidric de către mucoasa gastrică; - favorizează imunogeneza; - rol în elaborarea hormonilor cortico-suprarenali 	2-3 mg
Vitamina B ₃ (Adermina)	<ul style="list-style-type: none"> - intră în constituția transaminazelor, carboxilazelor, racemazelor; - contribuie la formarea aminelor biogene și aminoacizilor; - participă la formarea acidului gamma-aminobutiric; - rol în metabolismul glucidic (scindarea glicogenului); - rol în metabolismul lipidelor (sinteză de acizi grași); - absorbția intestinală a vitaminelor din grupul B; - sinteza de anticorpi 	3-5 mg

TABELUL 9.I (continuare)

Vitamine	Rol fiziologic	Necesar zilnic
Vitamina B ₁₂ (Ciancobalamina)	<ul style="list-style-type: none"> intervine în procesul de creștere și maturare a eritrocitelor; intervine în sinteza de ADN; este coenzimă acceptoare de hidrogen; este coenzimă în reacțiile de reducere a ribonucleotidelor în deoxiribonucleotide (etapă necesară în replicarea genetică) 	5 µg
Vitamina PP	<ul style="list-style-type: none"> reprezintă constituenții de bază al coenzimelor NAD și NADP, care ocupă poziții centrale în metabolismul glucidelor, lipidelor și proteinelor 	10-15 mg
Vitamina H	<ul style="list-style-type: none"> intră în complexe proteice cu funcții de coenzime, ce participă la sinteza acizilor dicarboxilici și tricarboxilici; acționează în metabolismul aminoacizilor, bazelor purinice, ureei și acizilor grași nesaturați 	150-300 µg
Acidul pantotenic	<ul style="list-style-type: none"> rol analog cu cel al coenzimei A (metabolismul intermediar) 	10-20 mg
Acidul folic	<ul style="list-style-type: none"> intră în componența coenzimelor; intervine în creștere și hematopoieză 	0,5-1 mg
Vitamina C	<ul style="list-style-type: none"> activează sisteme enzimatice; contribuie la transformarea dopaminei în noradrenalină; intervine în metabolismul unor aminoacizi aromatici; stimulează sistemul hipofizosuprarenal; acționează ca oxido-reductor reversibil; contribuie la formarea colagenului și a substanței intracelulare; metabolismul fierului; rol antiinfecțios 	Lactație: 50-70 mg Adolescenți: 150 mg

Oligoelementele (fier, cupru, cobalt, zinc etc.), deși sunt prezente în cantități extrem de mici, asigură structura unor enzime, a proteinelor transportoare de oxigen, hormoni și substanțe biologice active; în același timp, ele sunt importante substanțe activatoare și inhibitoare enzimatice.

Rolul și necesarul în minerale al organismului sunt prezentate în tabelul 9.II.

TABELUL 9.II

Rolul mineralelor și necesarul zilnic

Elementul mineral	Rol fiziologic	Necesar zilnic
<i>Macroelemente</i>		
Sodiul	<ul style="list-style-type: none"> principal component al echilibrului acido-bazic și osmotic; fenomene bioelectrice; constituent major al echilibrului hidric 	8-10 g

TABELUL 9.II (continuare)

Elementul mineral	Rol fiziologic	Necesar zilnic
Potasiul	<ul style="list-style-type: none"> rol în excitabilitate, contractilitate; rol în metabolismele muscular și nervos; rol în fenomenele bioelectrice 	3-4 g
Calciul și fosforul	<ul style="list-style-type: none"> menținerea integrității morfo-funcționale osoase; excitabilitatea neuro-musculară; permeabilitatea capilară; coagularea sângelui 	Calciu: 0,8-1,5 g Fosfor: 1,3-2 g
Magneziul	<ul style="list-style-type: none"> activator enzimatic; rol în excitabilitatea neuro-musculară; rol în contracția musculară 	0,2 g
<i>Oligoelemente</i>		
Fierul	<ul style="list-style-type: none"> intră în structura hemoglobinei cu rol în transportul oxigenului; intră în structura citocromilor celulari cu rol în oxidarea biologică 	10 mg
Cuprul	<ul style="list-style-type: none"> participă în structura unor enzime cu rol oxido-reductor; rol în melanogeneza; rol în imunitatea celulară 	2-3 mg
Cobaltul	<ul style="list-style-type: none"> acțiune sinergică cu vitamina B₁₂, stimulează formarea eritropoietinei 	2 mg/an
Zincul	<ul style="list-style-type: none"> intră în structura unor enzime cu rol de oxidare 	10-15 mg
Fluorul	<ul style="list-style-type: none"> intră în structura țesutului osos 	4 mg
Iodul	<ul style="list-style-type: none"> intră în structura hormonilor tiroidieni 	0,1-0,2 mg

Necesarul de apă al organismului. Necesarul hidric al unui adult este de 2 000-2 500 ml pe zi, din care 1 800-2 200 ml sunt de origine exogenă (1 000-1 500 ml lichide ingerate și 700 ml apă conținută în alimente solide sau semisolide), iar 300 ml sunt de proveniență endogenă (apa de oxidație rezultată din metabolism).

Necesarul de apă se adaptează în funcție de intensitatea proceselor metabolice, temperatura mediului și de cantitatea de solviji ce trebuie eliminată.

De asemenea, necesarul hidric variază cu vârsta, astfel:

Necesarul hidric mediu/kg/zi:

Vârsta	ml
sub 1 an	150
la 1 an	125
2 ani	120
4 ani	105
6 ani	95
10 ani	80
14 ani	55
18 ani	45
adult	35

Necesarul de celuloză al organismului. Fibrele alimentare, structuri conținute în plante, sunt considerate în prezent al VII-lea principiu alimentar, alături de proteine, glucide, grăsimi, vitamine, săruri minerale și apă. Nevoile zilnice sunt de 15–20 g/zi (realizabile prin consumul crescut de fructe, legume, pâine graham etc.).

Fibrele alimentare rețin apa, influențează favorabil activitatea bacteriană, cresc volumul materiilor fecale eliminate și accelerează tranzitul intestinal, contribuind esențial la fixarea și eliminarea unor metale, fitotoxine, virusuri, colesterolului, substanțelor cancerigene etc.

9.1.3. RAȚIA ALIMENTARĂ

Cantitatea de factori nutritivi sau de alimente necesare acoperirii nevoilor alimentare ale organismului în unitatea de timp (zi, săptămână) reprezintă rația alimentară.

Rația alimentară trebuie să satisfacă calitativ și cantitativ trebuințele nutritive ale organismului și ea se exprimă fie sub forma nevoilor energetice, fie sub forma nevoilor în factori nutritivi, sau sub forma nevoilor de alimente.

Pentru determinarea rației alimentare se stabilesc întâi nevoile organismului și, în funcție de acestea, se determină conținutul rației în calorii, protide, lipide, glucide, elemente minerale și vitamine, iar apoi, cunoscând compoziția alimentelor naturale, se fixează cantitățile necesare pentru asigurarea aportului energetic și în factori nutritivi.

Acoperirea necesarului energetic trebuie să țină seama de valoarea metabolismului bazal (variabilă în funcție de greutatea corporală, forma și suprafața corporală, vârstă, sex, stări fiziologice – graviditate, alăptare etc.), la care se adaugă cheltuielile de energie pentru ADS (acțiunea dinamic specifică), asigurarea nevoilor fiziologice și igienice, deplasări, activitatea fizică în funcție de profesiune, aspecte care au fost prezentate mai sus.

O alimentație normală va asigura, în același timp, toți factorii nutritivi aflați în raporturi echilibrate între ei și corespunzători, în același timp, stării fiziologice, condițiilor de mediu și caracteristicilor activității pe grupe de profesii.

Într-o alimentație rațională:

a) **proteinele** reprezintă 13–18% din valoarea calorică a acesteia, aproape jumătate fiind de origine animală. Pentru copii, aportul proteic atinge 18%, din care 2/3 proteine de natură animală. Un aport ridicat se păstrează și în sarcină și lactație, pentru ca în eforturile fizice foarte mari (peste 4 500 kcal) să scadă la 12%. În cazul activității la temperaturi scăzute, necesarul proteic se suplimentează cu 2–3% față de cel din condiții normale. Prin proteinele de origine animală este asigurat aportul în aminoacizi, dintre care cei esențiali predomină. Creșterea, convaleșcența, sarcina și lactația solicită maximal acest aport;

b) **lipidele** acoperă 25–30% din necesarul caloric, crescând la copii, în eforturi mari, până la 35–40%. Minimum lipidic este de 50–60 g/zi la o rație de 3 000 kcal, iar maximum de 150–180 g la o rație de 5 000 kcal. Având un coeficient mare caloric, se va evita consumul exagerat de lipide. La temperaturi scăzute, umiditate, vânt, rația lipidică va crește, spre deosebire de eforturile de viteză, eforturile de altitudine, unde va fi scăzută la 15–20%. În sarcină și la copii este necesar să se asigure cel puțin 15–20% lipide de origine animală (ouă, unt, smântână, brânză);

c) **glucidele**, ca principală sursă energetică, acoperă aproximativ 55–65% din necesarul caloric. Necesarul de glucide va varia între 250 și 550 g. Trebuie menționat că glucidele din fructe conțin în proporții adecvate mineralele și vitaminele indispensabile metabolizării lor;

d) **conținutul de minerale și vitamine** este asigurat de alimentația mixtă obișnuită. În cazul vitaminelor, se va ține seama de modul de preparare al acestora și de necesarul momentan. Un necesar predominant energetic va avea suficiente vitamine hidrosolubile, iar necesarul trofic va pune accentul pe vitaminele

liposolubile. Pentru a asigura realizarea rației alimentare raționale, se vor introduce în alimentația zilnică alimente cu valoare plastică mare (carne, lapte, ouă, pește și produse derivate), la care se vor adăuga alimente cu valoare energetică (făinoase) și cu conținut bogat în vitamine. Tabelul 9. III cuprinde conținutul de glucide, lipide și proteine al principalelor alimente și valoarea lor energetică raportate la 100 g produs integral asimilabil. Substanțele apropiate din punct de vedere caloric (izocalorice), cât și cele apropiate din punct de vedere al conținutului proteic (izotrofice) pot fi schimbate între ele pentru a asigura variația regimului alimentar. Chiar alimente din grupe diferite pot fi schimbate între ele, având valoarea calorică și conținutul proteic proporțional. Se va ține seama la calcul de eventualele pierderi prin pregătut și gătit.

TABELUL 9.III

Conținutul în trofine al principalelor alimente și valoarea lor energetică raportate la 100 g produs integral asimilabil

Alimentul	Glucide	Lipide	Proteine	Calorii	Procent neasimilat din 100 g	Necesar alimentar pentru 100 g
Lapte de vacă	4,8	4,0	3,5	68	–	100
Brânză slabă de vacă	–	22,0	17,0	97	–	100
Carne slabă de vacă	–	19,1	21,0	215	30	143
Carne slabă de porc	–	22	20,4	243	20	125
Carne slabă de găină	–	2,5	20,0	128	16	118
Ficat bovine	25	3,5	20,0	146	–	100
Salam	–	21,0	17,4	316	–	100
Șuncă presată	–	21,0	18,4	324	–	100
Crap	–	7,1	18,9	104	55	222
Ouă de găină (cca 50 g)	–	10,5	14,0	148	–	–
Cartofi	12	0,1	2,1	89	15	117
Mazăre verde (boabe)	1	–	8,4	96	53	212
Spanac	4	–	3,5	25	21	126
Varză	4,5	0,3	1,8	33	27	137
Cireșe amare	19,2	–	1,0	80	12	114
Mere	18	–	0,3	74	8	109
Pere	17	–	0,6	73	14	116
Piersici	14	–	0,9	56	12	114
Prune	17	–	0,6	74	15	117
Struguri	22	–	2,1	100	6	107
Vișine	16	–	1,2	65	11	112
Fasole uscată (boabe)	55	1,8	23,0	303	–	100
Mazăre uscată (boabe)	57	1,5	21,5	323	–	100
Pâine grâu albă	53	1,3	10,3	282	–	100
Orez decortical	83	–	7,6	351	–	100
Griș	82	–	11,2	354	–	100
Paste făinoase	85	–	9,6	360	–	100
Zabăr	100	–	–	410	–	100
Miere albă	84	–	0,4	335	–	100
Unt	–	99,7	1,0	787	–	100
Slănină	–	67,7	10,0	729	–	100
Untură de porc	–	99,6	0,3	925	–	100
Undelemn	–	100,0	–	925	–	100
Bere 4% alcool	12	–	0,7	51	–	100
Vin alb 8% alcool	13	–	–	60	–	100

O rație alimentară corespunde normelor atunci când s-a procedat la majorarea cantităților de alimente recomandate cu cantitățile care se pierd prin îndepărtarea părților necomestibile, cu pierderi în factori nutritivi, în cursul proceselor de preparare a mâncărilor și pierderile digestive.

Pierderile în factori nutritivi se datoresc dizolvării în apa de spălare sau fierbere (glucide, proteine solubile, săruri), precipitării (săruri) sau distrugerii sub acțiunea temperaturii. Pierderile digestive implică acele alimente care rămân neabsorbite și se elimină prin materiile fecale. Ele se apreciază prin coeficientul de utilizare digestivă (C.U.D.) ce reprezintă procentul de substanțe nutritive absorbite din cantitatea ingerată. În general, produsele de origine animală au un coeficient de utilizare digestivă mai ridicat decât cele de origine vegetală.

Datorită faptului că în condițiile unei alimentații mixte se absorb aproximativ 90–92% din factorii calorigeni, și în proporții variate factorii trofinici, valoarea calorică și trofinică reală a rației absorbite și, de fapt, metabolizate este diferită de cea a rației ingerate.

Alimentația rațională și munca. Alimentația este un factor decisiv de contribuție la promovarea și menținerea unei bune capacități de muncă, cu importante implicații în creșterea randamentului. O alimentație rațională, adecvată naturii ocupaționale, va trebui să ia în considerare următoarele elemente:

a) **cheltuiala de energie:** rația alimentară va fi calculată după criteriile care țin seama de cheltuielile bazale, metabolismul de repaus (echivalent mediu = 1,5 kcal/kg/oră), acțiunea dinamică specifică a alimentelor (+10%), coeficienții de utilizare digestivă (C.U.D.), la care se adaugă cheltuielile de energie în funcție de natura profesiei după tabele sau, mai corect, prin măsurarea consumului de oxigen. Observații făcute pe oameni au arătat că restricția ingestiei de alimente micșorează randamentul muncii și, de asemenea, că o rație insuficientă calorică duce la utilizarea proteinelor proprii ca sursă energetică (experimentul Carnegie, experimental Keys). Tulburări apar chiar dacă rația alimentară este echilibrată optim în ceea ce privește raportul dintre trofine: adinamie, atrofie musculară, degradare fizică și intelectuală.

Încercările de a evidenția creșteri semnificative ale consumului energetic în cursul activității intelectuale nu au dus la rezultate concludente, datorită, probabil, randamentului ridicat al activității neuronilor. Emoțiile, activitățile psihice stresante sunt, dimpotrivă, asociate cu creșterea metabolismului prin intermediul secreției de adrenalină;

b) **aportul de trofine, ritmul de alimentare:** glucidele reprezintă principalul combustibil în activitatea musculară; totuși, alimentația în care grăsimile furnizează mai puțin de 10% din valoarea ei energetică micșorează capacitatea de efort fizic și, în plus, toleranța la frig. Creșterea exagerată a caloriei provenind din lipide în detrimentul celor din glucide micșorează, de asemenea, capacitatea de efort. Creșterea proporției de lipide în rație, peste 20–25% din rația calorică totală, se recomandă numai celor cu activitate fizică grea (fără datorie de oxigen), având efecte pozitive asupra randamentului, ca și în cazul muncii la temperaturi scăzute. În caz că activitatea fizică depusă de subiect nu este pe măsura ingestiei de lipide, apare pericolul aterosclerozei.

Cantitatea de proteine trebuie majorată proporțional cu valoarea calorică a rației alimentare, având în vedere că nevoia de proteine a muncitorilor cu activitate fizică este cu cel puțin 50% mai mare decât a celor care practică profesii sedentare.

În ceea ce privește vitaminele, dacă necesitățile au fost atinse, suplimentarea nu mai are valoare. Totuși, unii autori recomandă creșterea ingestiei de vitamine (în special tiamină și niacină) în cazul creșterii cheltuielilor energetice.

În activitatea intelectuală, ca și în eforturile musculare intense, se impune suplimentarea nevoilor organismului în minerale (de exemplu, fosfor). Când efortul se desfășoară în condiții de temperatură ridicată, nevoia de ClNa crește. Printr-o alimentație alcalinigenă, bogată în fructe și legume, sau prin suplimentarea rației cu săruri alcaline, s-a putut prelunge timpul de lucru cu 30–100% și a crescut performanța de efort (Andrier, 1964).

S-au constatat efecte pozitive asupra forței de muncă atunci când: orarul meselor a fost fix, masa principală nu a fost consumată în intervalul de mare activitate fizică sau intelectuală, mesele au fost fracționate iar micul dejun consistent (recomandare valabilă când se lucrează ziua) și, de asemenea, atunci când s-a acordat toată grija ambianței și timpului necesar servirii mesei.

Alimentația rațională în cursul creșterii și dezvoltării fizice și intelectuale a individului. Influența alimentației asupra creșterii și dezvoltării a fost demonstrată de multiple observații, experimente și cercetări

populaționiste. Astfel, cele mai multe din ipotezele care stau azi la baza fenomenului de accelerație (fenomen de intensificare progresivă de la o generație la alta a tuturor proceselor creșterii și dezvoltării fizice și psihice) pun pe primul plan modificarea alimentației.

Dintre toate procesele care influențează creșterea, sinteza proteică este procesul fundamental. Regimul sărac în proteine are drept efect deficiențe ale creșterii în greutate și înălțime, începând chiar cu produsul de concepție. Numeroase cercetări comparative efectuate în diverse țări au arătat situarea mediei greutății și taliei la valori inferioare, față de martori, la copiii a căror alimentație era carentă mai ales în proteine biologice superioare și, de asemenea, tulburări de comportament, scăderea capacității de elaborare a reflexelor condiționate, pierderea dorinței de explorare etc. Primele șase luni de viață, îndeosebi, și vârsta preșcolară (0–6 ani) reprezintă perioada cea mai vulnerabilă pentru individ în cazul unei nutriții defectuoase.

Promovarea unei bune creșteri și dezvoltări fizice și intelectuale a individului impune în primul rând asigurarea unei alimentații raționale, echilibrată, variată și suficientă calitativ și cantitativ a mamei. O atenție aparte trebuie acordată alimentației sugarului cu lapte matern, cu care s-au obținut cele mai bune rezultate.

Alimentația rațională și longevitatea. Se consideră, în general, că nevoile calorice scad cu vârsta odată cu scăderea cheltuielilor energetice.

Recomandările F.A.O. privind aportul energetic în funcție de vârstă sunt redate în tabelul 9.1V.

TABELUL 9.1V

Vârsta (ani)	Restricție pe fiecare etapă %	Restricție cumulativă %	Aportul față de adultul de 25 de ani %
25–35	3	3	97
35–45	3	6	94
45–55	7,5	13,5	86,5
55–65	7,5	21	79
65–75	10	31	69

Odată cu înaintarea în vârstă, rația de glucide va fi moderată, nedepășind 300 g/zi, sursa importantă a acestora fiind amidonul și fructoza.

Un deziderat esențial este scăderea grăsimilor din alimentația subiecților de după 40 de ani, mai ales la cei cu activitate fizică redusă. Bătrânii tolerează mai greu ingestia de grăsimi, variațiile lipidelor în sânge sunt mai ample și durabile.

Rația zilnică optimă este în jur de 1 g/kg greutate corporală, acoperind cel mult 20–30% din nevoile calorice. Se reduce cu predilecție grăsimile, uleiurile vegetale având acțiune favorabilă datorită acizilor grași polinesaturați.

Cei mai mulți autori apreciază în prezent că reducerea rației de proteine este o eroare, mai ales că ea se asociază cu deficiențe în masticție, digestie, absorbție și asimilație. Se recomandă drept rație optimă 1,2–1,5 g/kg corp/zi, din care 50% să fie acoperită din proteine animale bogate în aminoacizi esențiali.

Vitaminele și mineralele ocupă un loc aparte în alimentația longevivilor. Cantități sporite de vitamine se introduc numai pe cale naturală (fructe, legume, brânzeturi proaspete, pâine integrală), evitându-se vitaminoterapia sintetică, care poate duce la dezechilibre riscante la bătrânețe.

Ca substanțe minerale, necesitățile sunt sporite în calciu și fosfor, aportul va fi corect în fier și potasiu, iar sodiul limitat.

Alimentația de protecție. Alimentația rațională trebuie să constituie și un important factor de creștere a rezistenței organismului, îndeosebi a capacității de apărare dobândite mai ales prin anticorpogeneză și mai puțin a sistemului de apărare nespecifică, considerat predominant genetic și afectat, în consecință, de alimentație numai în condiții extreme. Rolul pozitiv pe care îl au îndeosebi proteinele în apărarea antiinfecțioasă a fost demonstrat cu prisosință prin numeroase experimente. Indiferent de natura agentului patogen, cantitatea, dar, mai ales, calitatea aminoacizilor încorporați în hrană au o deosebită importanță atât pentru apărarea celulară (fagocitară), cât pentru cea umorală (anticorpogeneză), în mod special.

Alimentația de protecție, prin suplimentarea cu proteine și vitamine, acționează și asupra agresiunii diferitelor substanțe toxice din mediu pătrunse în organism în cazul expunerii ocazionale sau mai îndelungate (noxe profesionale etc.), prin conjugarea și eliminarea acestora și regenerarea enzimelor hepatice.

Principalele criterii ale conceptului de alimentație rațională. Instituirea unei alimentații raționale a individului trebuie să atingă obligator următoarele obiective:

a) asigurarea tuturor trofinelor necesare în cantități optime (proteine vegetale și animale, lipide vegetale și animale, glucide complexe și simple, vitamine, minerale, celuloză);
b) asigurarea echilibrului și proporției optime între trofine;
c) realizarea unei concordanțe între nevoi și aport;
d) asigurarea unei bune stări de nutriție, realizată prin cunoașterea valorii nutritive a produselor alimentare disponibile în vederea alcătuirii unei rații complete și echilibrate, a influenței proceselor tehnologice de preparare asupra alimentelor (distrugere, inactivare etc.), precum și a gradului de utilizare digestivă a hranei ingerate;

e) asigurarea unei alimentații adecvate vârstei, activității profesionale, stării fiziologice (graviditate, lactație, copii în dezvoltare), ca și în vederea creșterii rezistenței antiinfecțioase și antitoxice a individului;
f) alimentația diversificată; meniul zilnic să conțină alimente din toate cele șapte grupe în cantități corespunzătoare;

g) asigurarea variației regimului alimentar (fiecare masă să aibă produse atât de origine animală, cât și vegetală, evitarea combinațiilor neadecvate de alimente, de exemplu glucid-glucid, a folosirii aceluiași aliment la două mese în aceeași zi și a aceluiași aliment de două ori la aceeași masă, chiar dacă forma de pregătire diferă;

h) prevenirea nocivității alimentelor și evitarea consumării unui produs alimentar insalubru, ceea ce presupune: cunoașterea sursei agenților biologici și chimici ce pot fi vehiculați de alimentație, mijloacele de prevenire, respectarea riguroasă a condițiilor igienico-sanitare pe tot circuitul alimentelor;

i) proprietățile organoleptice ale alimentelor să corespundă deprinderilor consumatorilor (produse salubre, mâncare variată, corect pregătită, care să determine și să mențină senzația de sațietate cel puțin 4-5 ore, realizând starea de confort);

j) repartizarea rațională a rației alimentare în cursul zilei (3-4 mese la interval de 4-5 ore, care asigură o cantitate redusă de alimente la fiecare priză, digestie facilitată, coeficient de utilizare digestivă mărit, metabolism favorizat, stare generală mai bună); în cadrul ritmului de trei mese pe zi, repartizarea cantitativă va fi următoarea: dimineața - 30%, prânz - 50%, seara - 20%; la ritmul de patru mese pe zi: dimineața - 25%, gustarea - 15%, prânz: 35-40%, seara: 15-20%;

k) asigurarea rației cu material fibros (efect enterokinetic) și a unui volum corespunzător fiecărei mese (mai mare la cei cu alimentație predominant vegetală și mai mic la cei cu alimentație predominant animală);

l) respectarea condițiilor fiziologice generale de alimentare: fixitatea orelor de masă (condiționarea senzației de foame, condiționarea secretorie, motorie, neuro-umorală etc.), asigurarea unei ambianțe adecvate, ordinea felurilor din meniu, temperatura potrivită a alimentelor, acordarea unui timp suficient servirii mesei etc.

Idealul nutrițional spre care se tinde este acela de a furniza organismului cantitatea și calitatea exactă de alimente, de structură și energetice, de care acesta are nevoie la un moment dat.

9.2. FIZIOLOGIA DIGESTIEI

Prin digestie se înțelege totalitatea fenomenelor mecanice, chimice și fizico-chimice care asigură procurarea, transformarea, transportul și absorbția substanțelor alimentare în vederea prelucrării și asimilării lor de către organism.

Ca parte esențială a nutriției, digestia realizează ingerarea, prelucrarea și dezintegrarea alimentelor complexe în principii alimentare simple (nutrimente), pentru a putea fi utilizate la nivelul țesuturilor și organelor în scop plastic, energetic și funcțional.

Pentru a asigura nevoile energetice și plastice ale materiei vii, nutriția cuprinde procese complexe legate de aport (alimentația), de descompunere enzimatică a alimentelor în monomeri cu greutate moleculară mică, capabili de a pătrunde în mediul intern (digestia) și de trecere și transport al acestora la beneficiar (absorbția).

Digestia propriu-zisă se efectuează în mod diferit în seria animală. La unicelulare are loc intracelular, în vacuolele digestive, cu ajutorul echipamentului enzimatic lizozomal; substanțele preluate din mediul extern prin fagocitoză (ingerarea de particule) și prin pinocitoză (ingerarea de substanțe solvite) sunt astfel descompuse până la substanțe elementare, care trec prin membrana vacuolară pentru a fi orientate spre locul de întrebuințare. La pluricelulare, digestia se realizează în lumenul diferitelor segmente ale tubului digestiv, sub acțiunea catalitică a enzimelor, furnizate de glandele mucoase din segmentele respective sau din glandele anexe (salivare, pancreas, ficat). Mediul de reacție joacă un rol hotărâtor în aceste procese catalitice. La rândul său, absorbția devine un proces fizico-chimic complicat, de traversare a nutrimenților prin epiteliul intestinal activ în vederea pătrunderii lor în mediile interne.

La om, etapele amintite sunt bine reprezentate. Digestia constă din înlănțuirea unor complicate procese chimice precedate de fenomene mecanice de micșorare a particulelor alimentare ingerate. Omul fiind omnivor, acțiunea catalitică enzimatică este întărită de mediul lichidian din etajul respectiv al tubului digestiv. Digestia începe în gură, unde alimentele suferă primele transformări mecanice și chimice.

Digestia bucală este dominată de procesele mecanice, prin care alimentele ingerate sunt sfărâmate și amestecate cu salivă; acest act complex motor, conștient, necesită intervenția scoarței cerebrale. Procesele enzimatică sunt sărac reprezentate: ptialina, alfa-amilaza salivară acționează la pH neutru și numai asupra amidonului fierț sau copt, descompunându-l în lanțuri scurte de 2-3 monozaharide.

Digestia gastrică continuă sfărâmarea mecanică a alimentelor începută în cavitatea bucală. Substanțele alimentare sunt reținute în stomac o perioadă suficient de lungă atât în vederea amestecării lor cu sucul gastric, cât și pentru acțiunea catalitică exercitată asupra proteinelor și lipidelor de către enzimele specifice, excepție făcând amilaza salivară, ale cărei efecte încetează la scurt timp după pătrunderea alimentelor în mediul gastric acid. La sugar, în stomac este asigurată și digestia parțială a laptelui.

Digestia în intestinul subțire are loc mai ales în prima jumătate a acestuia, prin bogăția enzimatică oferită de sucul intestinal și de cel pancreatic, în prezența bilei, asigurând completa descompunere a alimentelor și crearea posibilității de străbătare a mucoasei de către acestea spre mediul intern al organismului. În acest sens, digestia în intestinul subțire este esențială și singura indispensabilă proceselor de nutriție.

În sfârșit, digestia intestinului gros completează într-o oarecare măsură, prin flora saprofită de fermentație și putrefacție, procesele digestiei enzimatică. Putrefacția, localizată în a doua porțiune a intestinului gros, se realizează sub acțiunea bacililor putreficus, perfringens, aminofilus și sperogenes, constând din dezaminarea și decarboxilarea resturilor proteice nedigerate, formatoare de baze aminice cu reacție bazică și toxicitate mare: dezaminarea fenilalaninei produce acid benzoic, a tirozinei → fenol, a triptofanului → indol și scatol, a argininei → ornitină și putrescină, a lizinei → cadaverină, a histidinei → histamină etc. Absorbți, acești compuși sunt conjugați în ficat. Cele două procese se găsesc în echilibru în condiții fiziologice.

Penetrarea și absorbția substanțelor simple prin peretele tubului digestiv se face cu preponderență în intestinul subțire, prin transport pasiv (bazat pe legi fizice) și mai ales prin transport activ (bazat pe legi biologice), asigurând trecerea a peste 90-95% din substanțele ce intră pe cale digestivă în organism. Acest procent ridicat se datorește suprafeței mari a mucoasei intestinului subțire și vascularizației sanguine și limfatice bogate la acest nivel.

Absorbția bucală și cea gastrică, deși prezente, asigură un procent insignifiant în aportul general digestiv. Absorbția în intestinul gros este limitată la apă, glucoză, săruri, ioni (Na^+ , Cl^-), unii acizi aminați, săruri biliare, vitamine, baze azotate. Proprietatea absorbantă a intestinului gros este utilizată în terapeutică în cazul administrării de medicamente pe cale rectală și în cazul clismelor nutritive.

În afară de digestia clasică cavității extra- și intracelulare, s-a pus în evidență o a treia formă de digestie, digestia de contact (sau de membrană). Ea apare ca etapă obligatorie în momentul în care substanțele alimentare vin în contact cu suprafața externă a membranei celulare intestinale și este asigurată de enzimele structurilor subcelulare (aminopeptidaze, esteraze, lipaze etc.).

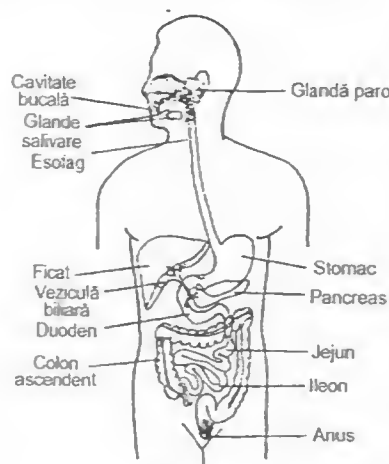


Fig. 9.1. Reprezentarea schematică a aparatului digestiv

Limba este un organ musculo-fibros acoperit de mucoasă prevăzută cu ridicături numite papile (fungiforme și circumvalate), în pereții cărora se găsesc mugurii gustativi ce reprezintă receptorii analizatorului gustativ (chemoreceptori).

Faringele este un tub larg prin care trec alimentele și aerul, constituind o răspântie a căilor respiratorii și digestive, făcând legătura dintre fosele nazale și laringe, precum și dintre cavitatea bucală și esofag. În peretele posterior al faringelui, în poia limbii, se găsesc amigdalele (jesut limfoid), cu rol în reținerea bacteriilor și toxinelor.

Esofagul, situat în torace, reprezintă un segment tubular, lung de 25–30 cm la individul adult, ce realizează legătura dintre faringe și stomac.

Musculatura esofagului este striată și netedă, innervată de fibre somatice și vegetative, ambele de origine vagală.

În porțiunile inițială și finală ale esofagului se găsesc două sfinctere, respectiv sfincterul esofagian superior (faringo-esofagian), format din mușchiul cricofaringian striat și constrictorul faringian neted, care previn intrarea aerului în esofag, și sfincterul esofagian inferior (gastro-esofagian), cu musculatură netedă, care previne refluxul gastro-esofagian.

Stomacul, cel mai dilatat segment al tubului digestiv, se găsește în abdomen, având forma de „cârlig de undiță”, cu două fețe (anterioară și posterioară), două margini sau curburi (marea și mica curbura) și două orificii: cardia, prin care comunică cu esofagul, și pilnricul, ce asigură legătura cu intestinul subțire.

Din punct de vedere anatomo-funcțional, stomacul prezintă o porțiune verticală, constituită din fundul stomacului (fornix sau camera cu aer) și corpul stomacului, și o porțiune orizontală, formată din antrul și canalul piloric ce comunică cu duodenul prin orificiul piloric.

Mucoasa gastrică este prevăzută cu glande gastrice, și anume: glande cardiale și pilorice, care secretă mucus, glande ale fundului și corpului stomacului, care secretă pepsină, HCl, și celule accesorii, ce secretă mucus.

Intestinul subțire este cel mai lung segment (4–5 m), care se întinde de la pilor la valvula ileo-cecală, prin care se deschide în colonul ascendent. Prima porțiune, duodenul, are forma de potcoavă și cuprinde în concavitatea sa capul pancreasului. Este prevăzută cu glande de tip intestinal. Jejunul și ileonul prezintă la nivelul mucoasei vilozități care măresc suprafața de absorbție.

Date de anatomie funcțională a aparatului digestiv. Aparatul digestiv este format din tubul digestiv și glandele anexe (glande salivare, ficatul, pancreasul).

Segmentele tubului digestiv sunt reprezentate de: cavitatea bucală, faringe, stomac, intestin subțire (duoden, jejun și ileon) și intestin gros (colonul ascendent, transvers, descendent) (fig. 9.1). Cavitatea bucală reprezintă prima parte a tubului digestiv, ce comunică în partea anterioară cu mediul extern prin orificiul bucal și posterior cu faringele, fiind despărțită de însele nazale prin bolta palatină.

Arcadele dentare împart cavitatea în două compartimente: vestibulul bucal și cavitatea bucală propriu-zisă, în care se găsesc organe specializate: limba și dinții.

Cavitatea bucală este tapetată cu o membrană mucoasă ce se continuă la nivelul buzelor cu un epiteliu stratificat asemănător pielii.

Mucoasa bucală secretă mucus și enzime, dar cea mai mare parte a secreției cavității bucale provine din glandele salivare. Mușchii bucali sunt sub control voluntar, fiind implicați în masticatie și parțial în deglutiție.

Intestinul gros, ultimul segment al tubului digestiv, de 1,7–2 m, are în componența sa cecul (zonă situată sub valvula ileo-cecală și terminat în fund de sac prevăzută cu apendicele vermiform) și colonul, care formează un cadru prin segmentele sale – ascendent, transvers, descendent și sigmoid; rectul, ultima porțiune a intestinului gros, se termină cu canalul anal, care se deschide prin anus.

Mucoasa intestinului gros nu prezintă vilozități, dar sunt prezente, în schimb, celule care secretă mucus.

Structura microscopică a peretelui tractului gastro-intestinal este unitară, reprezentată de următoarele straturi (fig. 9.2):

a) Mucoasa este formată din epiteliu, lamina proprie și muscularis mucosae; lamina proprie conține fibre de colagen și elastice, diferite tipuri de glande, noduli limfatici și capilare.

Muscularis mucosae este reprezentată de fibre musculare netede circulare, ale căror contracții formează pliuri ale mucoasei și care, în zonele cu vilozități, împing sângele și limfa cu substanțele absorbite din lumenul intestinal.

b) Submucoasa conține un strat tisular bogat în fibre elastice și de colagen, cu frecvente vase de sânge ce îl traversează. Tot aici, există o rețea nervoasă dispusă în plexuri (plexurile Meissner, cu rol atât senzitiv, cât și motor pentru muscularis mucosae și glandele secretoare).

c) Stratul muscular, cu fibre netede circulare interne și longitudinale externe, are rolul de amestecare și propulsie a chimului intestinal; conține plexurile motorii Auerbach care, împreună cu plexurile Meissner, constituie un sistem nervos intrinsec, bine reprezentat și interconectat, care coordonează autnom activitățile secretorie și motorie ale tractului gastro-intestinal.

d) Adventicea (tunica externă) este constituită din țesut conjunctiv lax, în jurul faringelui, esofagului și părții inferioare a rectului, și dintr-un țesut conjunctiv dens, acoperit de seroasa peritoneală, în celelalte segmente ale tubului digestiv.

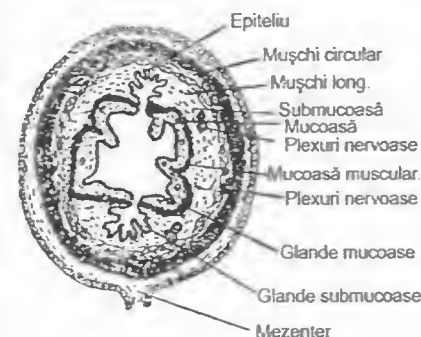


Fig. 9.2. Structura peretelui gastro-intestinal.

9.2.1. DIGESTIA BUCALĂ

Sub termenul generic de digestie bucală se înțelege etapa buco-faringo-esofagiană a digestiei care, în principal, se caracterizează printr-o serie de modificări fizice suferite de alimentele introduse în gură. Începând cu prehensiunea, act conștient, și continuând cu masticatia și insalivajia, în cavitatea bucală au loc formarea și pregătirea bolului alimentar ce va ajunge în stomac prin actul deglutiției.

Secreția salivară participă atât la formarea bolului alimentar în timpul masticatiei, cât și la hidroliza enzimatică a amidonului, ca fenomen chimic ce întregeste manifestările mecanice ale digestiei bucale.

9.2.1.1. Secreția salivară

Saliva este produsul de secreție al celor trei perechi de glande salivare anexate cavității bucale. Glandele salivare, fiind exocrine, își varsă produșii de secreție la exterior printr-un canal, pe suprafața epitelială a buco-faringelui. Ele prezintă două tipuri principale de celule: seroase, care sunt bogate în depozite de zimogen și a căror secreție este ptialina; mucoase, ce conțin granule de mucinogen, precursorul produsului de secreție – mucina; există și un al treilea tip de celule – mixte. Cele trei perechi de glande salivare sunt:

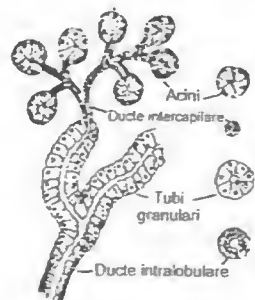


Fig. 9.3. Organizarea structurală a glandei submaxilare.

Pe lângă glandele salivare principale, mai există și o serie de glande salivare accesorii (cu acini mucoși) în pereții mucoasei bucale, cu rol mai puțin important.

Saliva. Este un lichid incolor, opalescent, vâscozitatea depinzând de proveniență și condițiile de excreție. La om, cantitatea de salivă secretată în 24 de ore variază de la 100 la 1 500 ml, la cal 40–50 de litri, iar la bovine peste 50 de litri. În perioadele de activitate secretorie, debitul poate crește la om până la 900 ml/oră. Densitatea salivei variază între 1,003–1,008 [punctul crioscopic = $(-0,2^{\circ}) - (-0,4^{\circ}\text{C})$]. Reacția salivei este slab acidă, cu un pH = 6,0–7,0. Saliva conține 99,4% apă și 0,6% substanțe solide (reziduu uscat), din care 0,2 g% anorganice și 0,4 g% organice, inclusiv celulele (epiteliu, leucocite).

Substanțele minerale ale salivei sunt reprezentate mai ales de combinații ale potasiului (concentrații mai mari decât în sânge), de clor, sodiu, bicarbonați și fosfați. Clorurile din salivă activează ptialina.

Substanțele organice sunt reprezentate de epiteliu, leucocite și mucină (0,2 g/dl), enzime și alte proteine (0,15 g/dl), restul fiind substanțe organice neazotate.

Principală enzimă din salivă este reprezentată de *alfa-amilaza salivară (ptialina)* care scindează amidonul, acțiune continuată și în stomac încă aproximativ 1/2 de oră. Amilaza descompune amidonul copt sau fiert în dextrine, polimeri cu moleculă mai mică. O altă enzimă este *lipaza* – care se găsește în saliva nou-născuților și care descompune tributirina din lapte. În salivă se mai găsește și *lizozim*, enzimă cu rol bactericid ce distruge capsula glicozidică a microbilor. Recent s-a pus în evidență și o enzimă proteolitică numită *kalicreină*, implicată în formarea de plasmakinine, vasodilatatoare locale.

Dintre proteine, *mucina* are rol important în formarea bolului alimentar. De asemenea, în salivă sunt prezente, la 80% din populație, aglutininele sistemului de grupe sanguine AB0, cu importanță în medicina legală.

Substanțele azotate neproteice sunt reprezentate de uree, acid uric, aminoacizi, creatinină. Dintre substanțele neazotate care intră în compoziția salivei menționăm acidul lactic.

Mecanismul secreției salivare și rolurile salivei. Celulele salivare acinoase secretă în porțiunea inițială a tubulor o salivă primară, care de-a lungul tubilor va suferi modificări în compoziția sa, rezultând saliva finală.

Saliva primară conține apă, ptialină și/sau mucină, uree și aminoacizi într-o soluție de ioni reprezentată de Na^+ , K^+ , HCO_3^- în concentrații izotonice cu plasma.

Celulele care formează tubulii au o ultrastructură caracteristică celulelor secretoare ce suferă modificări citologice în timpul secreției salivare.

Apă și toți ioni salivei primare provin din plasmă, cu excepția celui carbonic, care rezultă și din metabolismul celular al glandelor salivare.

Saliva primară își modifică compoziția pe măsura avansării ei în ductele salivare (aparitia de ioni noi, modificări ale raporturilor ionilor), prin schimburi cu sângele din capilarele peritubulare, înainte de a ajunge în canalele excretore.

– **glandele parotide**, de tip seros, situate în lojile parotidiene lângă conductul auditiv extern, cu greutate de 25–30 g. Produsul de secreție fluid și transparent (saliva de diluție) este eliminat la exterior, prin canalul Stenon, în vestibulul gurii, în dreptul celui de al doilea molar superior;

– **glandele submaxilare**, cu celule de tip mixt și seros (fig. 9.3) sunt situate sub planșul bucal, în vecinătatea unghiului intern al mandibulei. Fiecare glandă cântărește aproximativ 7 g și își elimină produsul de secreție prin canalul Wharton, lateral frâului limbii. Saliva submaxilară este mai vâscoasă și are rol în gustajie;

– **glandele sublinguale**, formate mai ales din acini mici, se găsesc deasupra planșului bucal, în loja sublinguală, având o greutate de 3–5 g fiecare. Produsul de secreție se elimină prin canalele Rivinius (5–6) în apropierea frâului limbii sau, uneori, printr-un canal unic, numit canalul Bartholin. Saliva secretată de glandele sublinguale este bogată în mucină și are rol în formarea bolului alimentar (salivă de deglutiție).

Modificările de compoziție cele mai importante au loc datorită proceselor de transport care deplasează K^+ și Na^+ în ambele sensuri prin traversarea pereților tubilor.

Astfel, K^+ este secretat activ la schimb cu Na^+ , care se reabsoarbe activ, mișcarea celor doi ioni fiind influențată de hormonii mineralocorticoizi (aldosteron), într-o manieră analogă acțiunii de la nivel renal. În saliva finală, concentrația ionului de K^+ este de aproximativ opt ori mai mare decât în sânge (40 mEq/l față de 5 mEq/l).

Reabsorbția în exces a Na^+ față de secreția K^+ creează în ductele salivare o negativitate în jur de -70 mV, care determină o reabsorbție pasivă a ionului de Cl^- direct proporțională cu reabsorbția de Na^+ .

În același timp, are loc o secreție a anionului HCO_3^- (probabil activă, ajungând la o concentrație de 2–3 ori mai mare decât în plasmă), precum și a iodului.

În cazul în care rata fluxului salivar crește (salivație abundentă), timpul necesar pentru resorbție și secreție este mai scurt, ceea ce va determina creșterea conținutului salivar în Na^+ , în timp ce K^+ se va concentra numai de patru ori mai mult decât în plasmă.

În prezența unei eliberări în exces a aldosteronului, reabsorbția de Na^+ și Cl^- , precum și secreția de K^+ sunt mult amplificate, ducând la o scădere a concentrației în salivă a primilor doi ioni apropiată de zero și la o creștere a concentrației de K^+ .

Creșterea eliminării de K^+ prin salivă timp îndelungat poate duce în anumite stări patologice la o depleție serioasă a acestui ion (hipokaliemie severă).

Efectul net al sumei ionilor absorbiți face ca aceștia să predomină față de cei secretați, încât, în final, saliva este hipotonică. Cu toate că gradientul osmotic al plasmăi este mai ridicat decât al salivei, relativ o mică cantitate de apă este reabsorbită prin pereții ductelor din cauza permeabilității scăzute la apă a epiteliului canalelor.

O serie de modificări ale sucului primar salivar sunt rezultatul difuziunii pasive (de exemplu, ureea). Altele provin datorită transportului activ prin celule (iodul este secretat alături de K^+ în salivă, de asemenea, la o concentrație care poate fi de câteva ori mai ridicată decât cea din plasmă).

Schimburile ionice sunt favorizate la nivelul glandelor salivare de circulația sanguină, care se face în contracurent printr-un veritabil sistem port dispus în serie (fig. 9.4).

În condiții bazale, saliva este secretată în cantitate de 0,5 ml/min, exceptând perioada de somn, când cantitatea este foarte mică. Secreția salivară joacă un rol major în menținerea stării de igienă a țesuturilor orale. Cavitatea bucală este încărcată cu bacterii patogene cu acțiune distructivă și favorizante ale apariției cariei dentare.

Saliva previne procesele de deteriorare bucale pe trei căi: (a) fluxul salivar ajută la eliminarea bacteriilor patogene, ca și a particulelor alimentare de suport al acestora; (b) conține în mod obișnuit factori de distrugere antibacterieni (lizozim – enzimă proteolitică, ioni de tiocianat); (c) în salivă sunt prezente adesea concentrații semnificative de anticorpi.

În absența salivei, țesuturile orale se pot ulceră și infecta, fenomene la care se adaugă apariția rapidă a cariilor dentare.

Pentru recoltarea salivei la animal se procedează la efectuarea de fistule salivare experimentale, fie temporare, prin introducerea unor canale în canalul de excreție al glandei, fie permanente, prin exteriorizarea la suprafața pielii a canalului. La om, obținerea de salivă pură poate fi făcută din canalizarea canalului excretor cu un tub de plastic prevăzut cu o capsulă în care se face vid.

Saliva îndeplinește următoarele roluri:

– facilitează masticajia și deglutiția, lubrifiind mucoasa și alimentele;

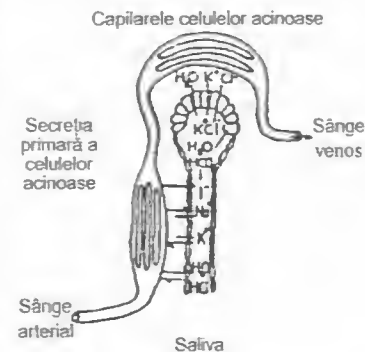


Fig. 9.4. Dinamica schimbului de electroliți în cursul formării salivei în glanda parotidă.

- solubilizează substanțele alimentare pentru a le pune în contact cu papilele gustative și a face posibilă stimularea acestora și apariția senzației de gust;
- lubrifică mucoasa bucală și linguală, favorizând vorbirea;
- exercită o acțiune degradativă asupra glucidelor, descompunând amidonul până la stadiul de maltoză;
- secreția salivară prezintă proprietăți bactericide;
- reprezintă o cale de eliminare a unor substanțe toxice, microorganisme și uree.

Reglarea secreției salivare. Secreția salivară este declanșată numai pe calea impulsurilor nervoase. Glandele salivare sunt lipsite de control umbral, dar unii hormoni pot influența funcționalitatea acestora.

Secreția poate fi stimulată pe căile:

- reflexă, prin stimularea mecanică a receptorilor tactili sau prin stimularea chimică a receptorilor gustativi din mucoasa bucală și cea linguală;
- asociată, prin activitatea muscularii masticatorii și a deglutiției;
- psihică, prin vederea, mirosirea sau aducerea aminte a alimentelor;
- umorală, directă asupra centrilor salivari.

Arcurile reflexe excito-secretoare salivare sunt constituite de:

- căile aferente senzitive, reprezentate de ramurile nervilor lingual, glosfaringian și vag;
- centrul salivar din substanța reticulată de la nivelul joncțiunii dintre bulb și protuberanță;
- căile aferente secretoare, care se impart pentru următoarele glande astfel:

• **glanda parotidă:**

a) fibrele parasimpatice (colinergice), cu origine în nucleul salivar inferior din bulb, ce se atașează nervului glosfaringian (IX). Fibrele se separă de nervul glosfaringian la nivelul gării jugulare, pătrund în nervul Jacobson (care își are originea în ganglionul Anderssch), apoi trec în nervul mic pietros superficial și ajung în ganglionul otic, unde fac sinapsă fibre postganglionare. Acestea urmează mai departe traiectul nervului auriculo-temporal, ramură a trigemenului, până la glanda parotidă;

b) fibrele simpatice (adrenergice), ce pleacă din măduva cervico-dorsală, de la nivelul segmentelor D₁-D₂ din coarnele laterale. Părăsesc măduva prin rădăcinile anterioare și, pe calea ramurilor comunicante albe, ajung în lanțul ganglionar simpatic, unde fac sinapsa în ganglionul cervical superior. Fibrele postganglionare urmează traiectul ramurii comunicante cenușii și trec fie în nervii micști, fie pătrund în glandă odată cu arterele;

• **glandele submaxilare și sublinguale:**

a) fibrele parasimpatice, ce pornesc din nucleul salivar superior situat în protuberanță, urmează apoi calea nervului intermediar Wriesberg, trec fără întrerupere prin ganglionul geniculat al facialului și coboară pe traiectul acestuia până la nervul coarda timpanului, care, în apropierea cavității bucale, se unește cu nervul lingual. Fibrele părăsesc nervul lingual în planșul bucal și fac sinapsa în mai mulți ganglioni mici, situați în hilul glandei submaxilare sau în ganglionul sublingual, în cazul celor care inervează glanda sublinguală;

b) fibrele simpatice, ce ies din măduvă prin rădăcinile anterioare ale segmentelor D₁-D₆, urmează calea simpatcă a ramurilor comunicante albe și ajung în lanțul ganglionar simpatic, făcând sinapsa în ganglionul cervical superior, de unde pătrund în glandă odată cu ramificațiile arterelor (fig. 9.5);

• **glandele parietale** (din obraji, buze, bolta palatină, peretele faringian) primesc inervația secretoare de la nervul glosfaringian.

Pe plan funcțional, cele două sisteme de inervație (colinergic și adrenergic) se completează. Astfel, excitarea corzii timpanului dă un răspuns salivar prompt, cu o salivă abundentă, fluidă, lăsând o cantitate mică de reziduu uscat; excitarea cordonului simpatic cervical determină apariția tardivă a unei salive în cantitate mică, mai vâscoasă și mai bogată în constituenți organici. De aceea, salivă fiziologică trebuie considerată ca rezultanta efectelor concertate ale celor două inervații, nu în sens antagonist, ci complementar. Substanțele parasimpatomimetice (acetilcolina) și cele parasimpatotrope (pilocarpina) măresc secreția salivară, în timp ce parasimpatoliticele (atropina), o reduc.

Declanșarea secreției salivare se notează prin:

a) **secreția prin mecanism reflex necondiționat**, care este cea mai importantă. Mișcarea maxilarelor în timpul masticăției, mobilizarea corpurilor străine în gură, contactul mucoasei bucale și a celei linguale cu substanțe pulverulente insipide sau alimentare sapide, cu produse acide sau amare, declanșează o salivă care are intensitate se adaptează cantitativ și calitativ la condițiile care au provocat-o.

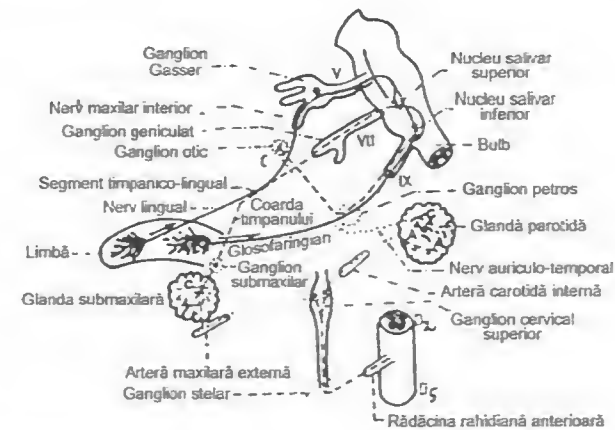


Fig. 9.5. Reprezentarea schematică a inervației glandelor parotidă și submaxilare și arcului reflex excito-secretor salivar. ---, indicarea formațiunilor anatomice, - - - - -, fibre preganglionare, fibre postganglionare, —, inervația senzitivă buco-faringiană. A, transmisie adrenergică, C, transmisie colinergică.

Secreția reflex necondiționată este declanșată de acțiunea stimulatoare a alimentelor asupra receptorilor gustativi și tactili.

Actul masticăției contribuie la întreținerea secreției salivare. Există, de asemenea, reflexe esofago-salivare și gastro-salivare determinate de distensia esofagului și stomacului (sialoreea din aerofagie) și ale căror căi aferente sunt fie nervii pneumogastrici, fie sistemul simpatic.

Excitațiile nociceptive, cum sunt cele plecate de la capătul central al nervului sciatic sau splanhnic, determină, de asemenea, o salivă reflexă, evident fără semnificație funcțională;

b) **secreția prin mecanism reflex condiționat:** atunci când se depun pe limba unui câine, purtător al unei fistule permanente a canalului Wharton, picături de acid acetic diluat (excitant necondiționat), apare o scurgere abundentă de salivă apoasă. Dacă se colorează soluția acidă în negru, de exemplu, pentru a o face ușor de recunoscut, și se repetă de mai multe ori operația depunerii pe limbă, după un timp se observă că numai prezentarea soluției negre (excitantul condiționat) determină o secreție salivară reflex condiționată, identică celei din reflexul absolut. Acest fapt explică cum, prin intermediul receptorilor senzoriali de la distanță (vizuali, auditivi, olfactivi), prin mecanisme psihice având la bază reflexe condiționate, secreția salivară se poate intensifica înainte de pătrunderea alimentului în cavitatea bucală;

c) **secreția prin mecanism central** este excepțională; ea se produce în asfixie, în cursul căreia centrul salivar sunt excitați de sângele încărcat cu CO₂. Mecanismul intercentral este, de asemenea, prezent în diverse circumstanțe: greață însoțită de salivă, emoțiile violente, care au efect inhibitor de uscare a gurii etc.

Salivă poate fi, de asemenea, stimulată sau inhibată și prin alte impulsuri sosite la centrul salivar de la structuri nervos-superioare. Față de alimentele preferate, salivă este mai abundentă decât față de cele ce sunt obișnuit evitate sau chiar indifferente. Centrul foamei influențează și modulează într-o măsură importantă astfel de aspecte, corelate cu participarea arilor corticale ale gustului și mirosului, și, de asemenea, cu amigdala din sistemul limbic.

Dintre hormoni care pot influența secreția salivară s-a menționat deja intervenția mineralocorticoizilor, în special a aldosteronului. S-a demonstrat, de asemenea, rolul hormonului somatotrop în troficitatea acinilor salivari, în creșterea capacității funcționale a granulațiilor zimogene și puterii amilolitice a ptialinei salivare. Hormonul retirohipofizar anti-diuretic reduce salivă, diminuând și pe această cale pierderile de lichide.

9.2.1.2. Fenomenele mecanice ale digestiei bucale

În perioada de început a vieții extrauterine, aproape toate mamiferele prezintă reflexul înăscut de sucțiune, cu origine bulbo-protuberanțială. Mai târziu, preheosiunea alimentelor și introducerea lor în cavitatea bucală se efectuează atât prin mișcări reflexe înăscute, cât și prin gesturi câștigate prin condiționare.

9.2.1.3. Masticația

Realizează prelucrarea mecanică și insalivarea în cavitatea bucală a alimentelor ingerate, prin participarea dinților și a mușchilor ce asigură mișcările mandibulei, buzelor, limbii și obrazilor. Dinții au un rol important în masticatie, prin tăierea și zdrobirea alimentelor. Ei conțiu în interior camera pulpară, cu țesut conjunctiv, vase sanguine și filete nervoase. Pereții acestei camere sunt formați dintr-o substanță de consistență dură, numită dentină, care este acoperită de smalț, la oivelor coroanei dentare, și de cement, la nivelul rădăcinii.

Matricea dentinei este formată din substanțe organice (colagen, glicoproteine) în relație structurală intimă cu componenta minerală, reprezentată de cristale de hidroxiapatită, cu dimensiuni de 400–800 Å.

Smalțul reprezintă cel mai dur țesut din organism și se formează încă din perioada dezvoltării fetale. Cementul este un țesut cu structură analogă osului, secretat de membrana periodontală (periodonțiu), ce învește alveola dentară, și are rol în fixarea dintelui în cavitatea alveolară.

Dentina și pulpa dentară prezintă o mare sensibilitate, evidențiată prin senzații foarte dureroase, atunci când intensitatea stimulilor și accesul acestora fac posibilă acțiunea lor asupra receptorilor de la nivelul celor două structuri.

Mușchii care intervin în procesul de masticatie sunt mușchi striati în număr de 7, împărțiți în 4 grupe funcționale:

- ridicători și propulsori: mușchii maseter și pterigoidian intern;
- ridicători și retractori: mușchiul temporal;
- coborători și propulsori: mușchiul pterigoidian intern;
- coborători și retractori: mușchii milohioidian, genihioidian și digastric.

Inervația acestor mușchi este asigurată de trigemen, în afară de mușchiul genihioidian care este inervat de hipoglos. La om, mecanica masticației implică o combinație a mișcărilor de coborâre și ridicare cu cele de rotație, de retropulsie și de lateralitate; toate acestea sunt permise datorită unor caractere speciale ale articulației temporo-mandibulare.

Așadar, masticația este ansamblul mișcărilor voluntare ale maxilarelor, limbii și dinților care antrenează dilacerarea alimentelor, având ca rezultat:

- măcinarea alimentelor, astfel încât fibrele colagee și țesuturile vegetale care conțin celuloză (inatacabile prin digestie enzimatică) sunt înmuiate;
- alimentele sunt amestecate cu saliva, care determină hidratarea bolului alimentar și asigură un contact cu enzimele salivare;
- triturarea alimentelor și îmbibarea particulelor triturate cu salivă previne escoriația segmentelor tubului digestiv.

În coborârea mandibulei intervin pânțelele anterior al digastricului, milohioidianul și genihioidianul. Pentru ca aceștia să poată acționa, este necesar ca osul hioid mobil să fie mai întâi fixat. Această imobilizare se realizează prin contracția mușchilor subhioidieni (omohioidianul, tirohioidianul și sternohioidianul), inervați de ramura descendentă a hipoglosului.

Închiderea gurii și menținerea ei închisă, cu dinții apropiați, dar nearticulați unii de alții, se face fără activitate musculară tetanică evidentă. Mușcătura, însă, determină o activitate intensă la nivelul celor trei părți ale temporalului (anterior, posterior și mijlociu), maseterului și pterigoidienilor externi, și mai slabă la nivelul pterigoidienilor interni și pânțelului anterior al digastricului.

Reîntoarcerea la poziția de repaus se face aproape fără activitate musculară. Retracția activă, dincolo de poziția de repaus, pune însă în activitate temporalul anterior și posterior. La mișcările de lateralitate participă partea posterioară a temporalului de partea respectivă, pânțelele anterior al digastricului, milohioidianul și genihioidianul (fig. 9.6).

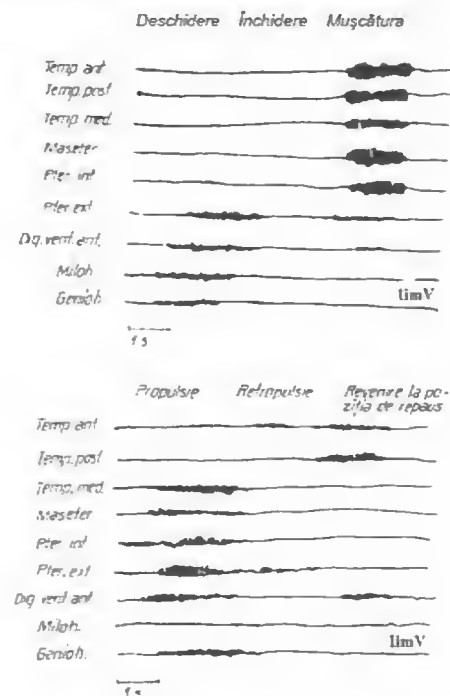


Fig. 9.6. Activitatea electrică a mușchilor masticatori în cursul diferitelor deplasări ale mandibulei.

Prelucrarea mecanică masticatorie realizează succesiv tăierea, zdrobirea și măcinarea hranei.

Având în vedere structura și funcția heterogenă a musculaturii masticatorii, pare mai exact a considera cel puțin unii din acești mușchi nu ca unități funcționale omogene, ci ca elemente componente ale unui hamac muscular ce susține mandibula în mișcare. Aceasta pentru că diverse fascicule ale aceluiași mușchi (de exemplu, pterigoidianul extern, temporal) pot prezenta mișcări disociate, unele în același sens cu ridicătorii mandibulei, altele cu coborătorii, încât activitatea totală a acestor mușchi rezultă din manifestările lor contrare.

Eficacitatea masticației depinde atât de suprafața articulară de contact al dinților mandibulari cu maxilarul superior, cât și de forțele dezvoltate de mușchii masticatori, apreciate de Fick până la 400 kg. Ocluzia gurii, tensiunea pereților obrazilor și mobilitatea limbii asigură în timpul masticației menținerea alimentelor pe suprafețele articulare ale dinților, iar cu ajutorul salivei se realizează umețirea și coostituirea bolului alimentar.

Se descriu trei tipuri de reflexe masticatorii:

- reflexul de ronțait, ca răspuns la stimularea regiunii incisivilor,
- reflexul masticator vertical, ca răspuns la stimularea mucoasei din dreptul celui de-al doilea molar; se manifestă prin mișcări de închidere și deschidere a gurii,
- reflexul de ruminație, care survine ca urmare a stimulării molarilor posteriori și coostă în mișcări laterale de mestecare.

Introducerea alimentelor în gură declanșează reflexele bulbo-protuberanțiale de masticatie și salivatie prin mecanismul excitării receptorilor sensibilității gustative, tactile bucale, cu participarea căilor aferente ale corzii timpanului și glosofaringianului, în cazul receptorilor gustativi, și ale trigemenului pentru sensibilitatea tactilă și

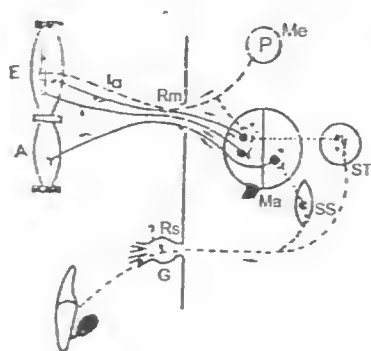


Fig. 9.7. Reflexul miotatic trigeminal al buclei gamma și reflexul de coborâre mandibulară. Efectele excitatoare sunt însemnate cu (+), iar cele inhibitoare cu (-). E, mușchi ridicători. A, mușchi coborâtori. P, parodontiu. Me, nucleul mezencefalic. G, ganglionul Gasser. Ma, nucleul masticator; în partea dreaptă sunt reprezentați motoneuronii digastricului. ST, nucleul supra-trigeminal. SS, nucleul spinal al trigemenului. ---, ramuri senzitive (Rs). —, ramuri motorii (Rm). legătura între nucleul masticator și fibrele mușcinice

maseter care generează impulsuri ce pleacă de la receptorii sus-menționați, transmis prin fibre de tip Ib ce intră în alcătuirea nervului mandibular și ajunge în neuronii ganglionului Gasser. De aici, impulsurile călătoresc spre nucleul senzitiv al trigemenului, unde se face sinapsă și de unde se transmit nucleului masticator, inhibând motoneuronul mușchilor ridicători ai mandibulei și facilitând coborâtorii maodibulei. Se respectă astfel principiul Sherrington al inervației reciproce, și anume, contracția unui mușchi se asociază de facilitarea agonistilor și inhibiția antagoniștilor.

La aceste reflexe miotatice se mai adaugă și reflexul de coborâre a mandibulei. Acesta este inițiat de excitarea receptorilor mucoasei bucale, ai giogiilor, dinților și articulațiilor mandibulare. Și acest reflex are o componentă facilitatoare și una inhibitoare, dar căile exacte sunt mai puțin cunoscute. Sunt interesante în aceste căi neuronii din ganglionul Gasser, nucleul spinal al trigemenului și motoneuronii din nucleul masticator. La cele expuse până acum se adaugă și reflexul linguo-maxilar, ce se manifestă prin căderea maodibulei la aplicarea unui stimul unic pe limbă.

Masticția, ca act reflex, rezultă, așadar, din alternanța reflexelor de coborâre și ridicare a maodibulei, cu participarea căilor aferente și eferente ale trigemenului, hipoglosului și glosfaringianului. Astfel, introducerea alimentelor în cavitatea bucală stimulează receptorii mucoasei bucale și determină reflexul de coborâre a mandibulei. Acesta, prin întinderea fusurilor neuro-musculare ale mușchilor ridicători, declanșează reflexul miotatic, urmat imediat de contracția mușchilor și de contactul prin presare a bolului alimentar de mucoasa bucală, dinți, giogii. Stimulii porniți de aici inițiază un nou reflex de coborâre a mandibulei și procesul continuă ciclic mai departe.

În cursul masticției, neuronii motori ai nervilor V, VII și XII sunt sub controlul direct al impulsurilor de la receptorii din ariile nervilor senzitivi V, VII și XII precum și al receptorilor din zonele dentare.

Cele prezentate până aici reflectă concepția clasică asupra mecanismului masticției, realizat prin succesiunea ritmică a mișcărilor reflexe de ridicare și coborâre a mandibulei și intercondiționarea lor reciprocă.

proprioceptivă. Dacă la nivel periferic aceste căi sunt distincte, la nivelul releului talamic și al zonei de proiecție corticală ele se intrică, fiind greu de diferențiat. Excitarea unei zone corticale dinaintea suturii coronare și în imediata vecinătate a centrului gustativ determină mișcări de masticție, în timp ce distrugerea acestora face imposibilă prehensiunea alimentelor și masticția. Centrii corticale nu sunt însă indispensabile. La iepuri cu centrii corticale distruși, Bremer (1923) constată totuși existența a trei tipuri de reflexe de masticție: de ronțăire, masticție verticală și masticție orizontală. Acestea depind de locul de stimulare reflexă, mergând dinaintea îndărăt, de la nivelul mucoasei incisivilor spre zona receptoare din jurul molarilor. Centrii superiori intervin ca facilitatori ai mecanismului reflex de bază, bulbo-protuberanțial. Astfel, sensibilitatea proprioceptivă a maseterului constituie baza de plecare a unui reflex miotatic, monosinaptic (Hugelin și Benvallet, 1957).

Reflexul miotatic, numit și trigeminal deoarece este coordonat de centrul nervos bulbo-protuberanțial al acestuia, este declanșat inițial de deschiderea voluntară a gurii, cu întinderea fibrelor musculare ale mușchilor maseter. Fibrele aferente de tip Ia ale reflexului, stimulate de terminațiile anulo-spirale ale fusurilor neuro-musculare întinse, trimit centripet impulsuri la nucleul bulbar senzitiv al trigemenului. Prio axonul acestor neuroni, impulsul ajunge la nucleul motor pontin al trigemenului ce conține motoneuronii alfa, iar, de aici, impulsul motor este transmis la mușchii maseter, care a declanșat reflexul, și-l contractă (fig. 9.7).

Receptorii musculo-tendinoși Golgi inițiază reflexul miotatic invers. El este declanșat de contracția mușchilor

Faptul însă că ritmul masticției declanșate prin stimulare corticală persistă și după secționarea tuturor căilor aferente pune în discuție existența unui centru al masticției ritmice, situat la oivelul trunchiului cerebral, cu acțiuni coordonatoare (activatoare și/sau inhibitoare) asupra motoneuronilor nervilor cranieni implicați în masticție (V, VII, XII). Acest centru primește informații de la scoarță, nucleii bazali, sistemul limbic, formațiunea reticulată și receptorii bucali, având un rol deosebit în corelarea funcției masticatorii cu celelalte manifestări digestive.

9.2.1.4. Deglutiția

Deglutiția succede masticției; este un fenomen mecanic prin care are loc propulsia alimentelor din gură în stomac, prin esofag. La fătul uman, deglutiția este declanșată la 12 săptămâni, deși mișcările respiratorii și de suclune nu apar decât în a 24-a săptămână de viață fetală. Deglutiția este deci, o funcție „ancestrală” mult mai veche decât respirația. Ea are loc în trei etape: timpul bucal, fariogian și esofagian.

Timpul bucal: deglutiția debutează cu plasarea alimentului masticat, insalivat și adunat sub formă de bol pe fața posterioară a limbii, pentru a se termina cu trecerea acestuia prin istmul buco-fariogian, limitat de pilierii anteriori (mușchii palatogloși). Apoi, bolul alimentar situat în spațiul cuprins între dosul limbii și bolta palatină este împins posterior, prin acțiunea de pistoa realizată de ridicarea vârfului limbii pe arcada dentară superioară și apoi pe bolta palatină, în timp ce baza limbii coboară. Aceste două mișcări simultane creează un plao înclinat în jos și înapoi. Ulterior, întreaga parte anterioară a limbii se ridică și se lipește pe palat, propulsând bolul spre faringe printr-o mișcare bruscă, în sus și îndărăt. Durata timpului bucal este în general scurtă, de aproximativ 0,3 s, și se asociază cu oprirea masticției și respirației. Timpul bucal este sub control voluntar.

Deglutiția lichidelor: când se bea un lichid prin suclune sau prin aspirație, presiunea subatmosferică este realizată în cavitatea bucală printr-o retracție a limbii, fără separarea obturației limbă-palat. Astfel, cavitatea bucală se umple, apoi partea posterioară a limbii se coboară brusc, pentru a permite lichidului să coboare în farox. Maxilarul inferior se ridică, închizând cavitatea bucală și mișcarea de deglutiție începe printr-o mișcare de baleaj a părții posterioare a limbii.

Deglutiția de aer: când limba împinge bolul alimentar în faringe, o cantitate de aer, care în mod normal este prezentă aici, trece în mare parte înainte ca glota să se închidă și numai întâmplător o bulă de aer este împinsă în esofag înaintea bolului alimentar. Aerul înghițit, în cea mai mare parte, nu trece de esofag și este expulzat prin eructație, dar o anumită cantitate poate pătrunde în stomac și intestin. De asemenea, aerul conținut în saliva mucoasă sau în alimente este înghițit. În cursul unui prânz se pot înghiți până la 500 cm³ aer. Aerul, de asemenea, poate fi înghițit voluntar, mobilizat de limbă, în timp ce buzele sunt închise. Aerul din prima respirație a nou-născutului poate fi înghițit, acest fapt fiind dovedit pe radiografii seriate ce arată că distensia inițială a plămânilor la 5 din 8 copii urmează distensiei și compresiei cavității faringiene.

În conținut, deglutiția se realizează prin mecanisme neuro-reflexe complexe, care fac pentru scurt timp din faringe – organ cu funcții multiple – o cale adecvată de deplasare a bolului alimentar din gură în esofag și, de aici, în stomac, inițiată voluntar de împingerea bolului spre câmpul receptor de la nivelul faringelui, laringelui și esofagului. Odată ajunsă în această fază și declanșată, deglutiția nu poate fi stopată voluntar, deoarece este un reflex stereotip cu răspunsuri de tip „tot sau nimic”.

Calea aferentă, reprezentată de filetele senzitive ale glosfaringianului și vagului, face legătura între zona reflexogenă (zona Vasilief) de la nivelul vălului palatului și pilierilor anteriori ai faringelui, pe de o parte, și centrul deglutiției din formațiunea reticulată bulbară, pe de altă parte. Acesta este localizat sub ventriculul al IV-lea, în vecinătatea ouelului solitar al vagului, a centrului masticator, cu care se află în antagonism reciproc, și a centrului respirator bulbar.

Căile eferente sunt formate din fibrele motorii ale hipoglosului în cazul limbii, spinalului pentru vălul palatului și vagului în cazul constrictorilor faringelui și esofagului. Proiectarea conținutului bucal (salivă sau alimente) pe zona sensibilă din jurul deschiderii fariogelui declanșează contracția aproape simultană a mușchilor implicați în închiderea foselor nazale și laringelui, concomitent deschiderii faringelui prin lărgirea

istmului buco-faringian datorită ridicării vălului palatin. Întregul proces se consumă în 1-2 secunde, însoțit fiind de oprirea respirației, datorită relațiilor de vecinătate dintre centrul respirator și centrul deglutiției.

Timpul faringian: din momentul în care bolul alimentar atinge faringele posterior, evenimentele scapă de sub controlul voluntar. Timpul faringian constă în contracții musculare în amonte de bol și inhibarea lor în aval, în concordanță cu fenomenele respiratorii. Se disting trei faze ale acestui timp al deglutiției:

- trecerea prin faringele superior; pasajul este marcat de:
 - a) o contracție a limbii dinainte înapoi, care se mulează pe vălul palatin și faringele posterior;
 - b) o ridicare a vălului palatin și o relaxare a pilierilor posteriori, însoțită de lărgirea faringelui și obturarea foselor nazale;
- trecerea prin faringele mijlociu: bolul este propulsat de unda de contracție determinată de constrictorul mijlociu. Diametrul antero-posterior al faringelui este crescut, ceea ce determină deplasarea înainte și în sus a laringelui: traheea și esofagul urmează aceleași mișcări cu ale laringelui, osul hioid se mișcă în sus și înainte, în timp ce epiglota basculează în spate într-o poziție orizontală sau oblică;

• trecerea prin hipofaringe, marcată de relaxarea constrictorului inferior al faringelui (sau mușchiul crico-faringian), care va determina creșterea diametrului hipofaringelui, în timp ce epiglota este închisă (fig. 9.8).

Ansamblul acestor fenomene motorii proiectează bolul alimentar în esofag cu o presiune cuprinsă între 40 și 135 cmH₂O, care se menține aproximativ 1/2 secunde. Această hiperpresiune este precedată de o undă de presiune negativă, anulând presiunea fiziologică existentă în repaus.

Comanda celui de al doilea timp al deglutiției necesită o acțiune simultană a centrului respirator și a nucleului de origine a nervului IX cranian. Acest stadiu reflex începe când bolul alimentar atinge receptorii tactili ai feței posterioare a faringelui, vălului palatului și glotei. Influxul centripet merge pe calea nervului glosfaringian, dar și pe cale vagală. Centrul nervos este la nivel bulbar, dar și substanța reticulată are un rol esențial în reglarea controlului deglutiției (sistemul interneuronal). Nervii implicați în sistemul eferent sunt: V, VII, X, XI, XII, care inervează mușchii limbii, faringelui și hipofaringelui.

Timpul esofagian asigură deplasarea bolului prin cele două tipuri de unde peristaltice, cu origine și caracteristici diferite. Primele, fiind continuarea undelor plecate din faringe, ajung rapid la stomac (5-7 s). Dacă alimentele ingerate nu trec din esofag în stomac în intervalul scurt al unei primare, distensia esofagiană constituie factorul de declanșare a undelor peristaltice secundare. Acestea vor continua de sus în jos până la gurile esofagului. Spre deosebire de unda peristaltică primară, care este indusă de excitarea reflexă a zonei sensibile faringiene cu participarea căilor aferente și eferente vagale, undele secundare rezultă din distensia muscularii netede de la nivelul celor 2/3 inferioare ale esofagului.

Procesul de deglutiție comportă multiple mecanisme de securitate prin care bolul va trece din cavitatea bucală numai în faringe și esofag:

- apropierea pilierilor laterali ai palatului și ridicarea porțiunii posterioare a limbii împiedică întoarcerea bolului alimentar în cavitatea bucală;
- contracția simultană a pilierilor laterali ai palatului și ridicarea palatului moale și a luei împiedică penetrarea alimentelor în fosele nazale;
- penetrarea în laringe și trahee este prevenită prin ridicarea laringelui, coborârea epiglotei, contracția corzilor vocale care închid glota, toate acestea fiind însoțite de inhibarea ciclului respirator.

9.2.1.5. Secreția și motilitatea esofagiană

Funcția esofagului contribuie la mișcarea alimentelor din faringe spre stomac. În același timp, de o importanță deosebită este prevenirea intrării aerului în esofag, ca și revenirea conținutului corosiv prin refluxul gastro-esofagian. Secreția esofagiană este în inregime mucoasă, cu rol de lubrifiant și facilitare a timpului esofagian al deglutiției.

Musculatura esofagului este, în general, identică cu cea a tractului gastro-intestinal, excepție făcând 1/3 superioară a acestui organ, în care musculatura internă și fibrele longitudinale externe sunt striate. În 1/3 inferioară, mușchiul esofagian este format în întregime din celulele muscularii netede. În 1/3 mijlocie se constată coexistența mușchiului striat și a celui neted.

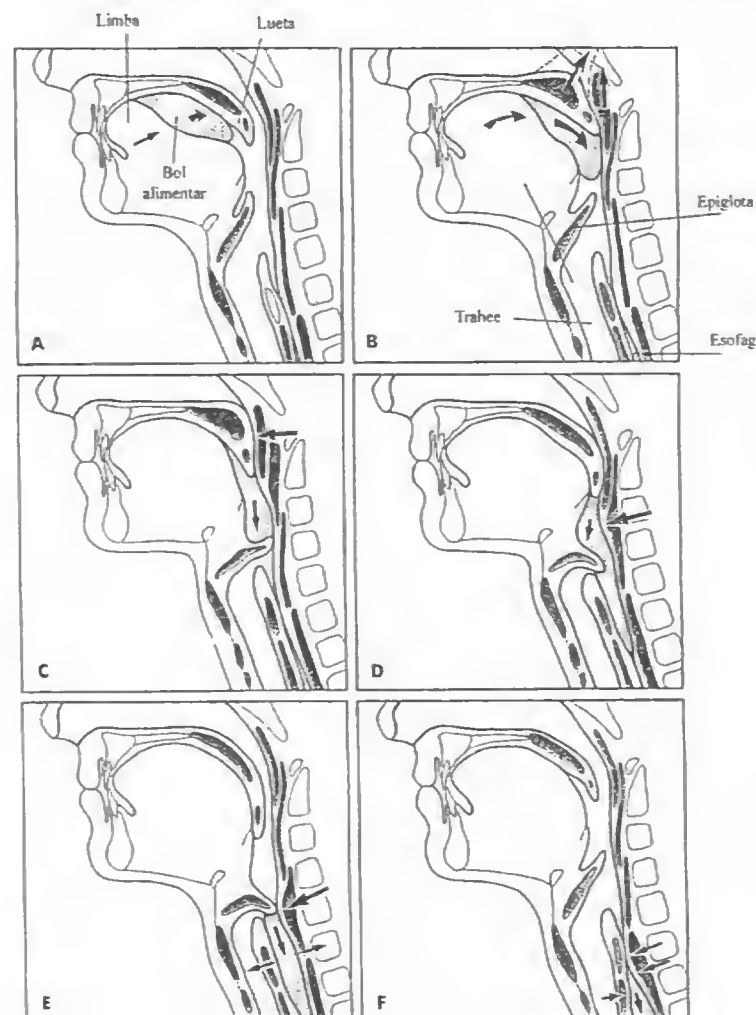


Fig. 9.8 Timpii deglutiției.

Musculatura esofagiană, atât striată, cât și netedă, este inervată de ramuri ale nervului vag. Fibrele somatice ale vagului (sosite din nucleul ambiguu) formează plăci neuro-motorii pe fibrele musculaturii striate. Fibrele viscerele motorii provenite din nucleul dorsal minor al vagului sunt fibre parasimpatice preganglionare și sinapsa lor se află pe neuronii plexurilor mienterice, care se continuă cu fibre postganglionare parasimpatice.

Activitatea mecanică de la nivelul esofagului se traduce prin trei tipuri de unde de contracție esofagiană.

Unde primare (unde propulsive principale). Aceste unde iau naștere sub sfincterul superior al esofagului atunci când are loc înghițirea alimentelor sau a salivei. Propulsia bolului alimentar de-a lungul faringelui până la esofagul superior determină apariția acestei unde primare cu o forță importantă. Durata tranzitului esofagian variază în funcție de consistența alimentelor (lichidele putând parcurge esofagul în 2 secunde) (fig. 9.9).

Unde secundare (unde propulsive secundare). Aceste unde peristaltice sunt declanșate de distensia esofagului ca urmare a prezenței bolului alimentar în esofagul superior sau a unui reflux gastro-esofagian (în esofagul inferior). Ele au aceleași caracteristici de amplitudine și viteză de propagare ca și undele primare. Ele persistă mult timp când alimentele staționează în esofag și, pe lângă rolul lor propulsiv, au și rol de curățire a esofagului.

Unde terțiare. Acest tip de unde nu sunt propulsive. Ele reprezintă contracții simultane și spontane ale mușchilor netezi. Ele apar mai rar la subiecții tineri sănătoși, iar la subiecții în vârstă sunt mai frecvente și se pot opune deglutiției.

Segmentele superior și inferior ale esofagului funcționează ca sfinctere, prevenind intrarea aerului și conținutului gastric în esofag: sfincterul esofagian superior (faringo-esofagian) și cel inferior. Sfincterul

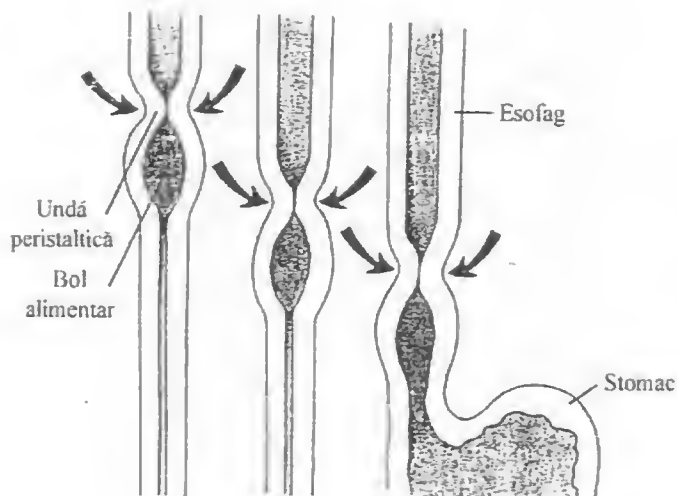


Fig. 9.9. Peristaltismul esofagian.

esofagian superior este format din musculatură circulară striată (mușchiul cricofaringian). Sfincterul esofagian inferior este greu identificabil anatomic, dar ultimii 1-2 cm ai regiunii inferioare a esofagului funcționează neindivizibil ca sfincter. În mod normal, presiunea la nivelul sfincterului inferior este totdeauna mai mare decât cea din stomac.

Funcționarea sfincterului esofagian inferior are o importanță particulară. Când unda peristaltică esofagiană ajunge la el, îl deschide. Răspunsul de deschidere este mediat vagal, dar transmitătorul implicat este fie acetilcolina, fie noradrenalina. În absența peristaltismului esofagian, sfincterul rămâne închis, prevenind refluxarea conținutului gastric, care poate determina esofagite și senzație de arsură.

Acetilcolina eliberată din terminațiile nervoase prezente în fibrele musculare stimulează contracția sfincterului.

Sfincterul inferior esofagian cunoaște și o componentă umorală a reglării. Astfel, hormonul gastrina, eliberat de celulele G specifice, pilorice și duodenale, stimulează sfincterul esofagian inferior ca un important mecanism de control al contracției acestuia când secreția gastrică este crescută. Aceeași acțiune o prezintă și histamina.

Colecistokina, în schimb, scade presiunea sfincterului esofagian distal, probabil prin ocuparea receptorilor pentru gastrină, împiedicând rolul stimulator al acesteia (mecanism competitiv).

Aceeași acțiune hipotensivă o au secreția și hormonii estrogeni.

Refluxul gastro-esofagian. În momentul în care undele primare parcurg esofagul, are loc și relaxarea sfincterului esofagian inferior (cardia), permițându-se pătrunderea alimentelor ingerate în stomac. Relaxarea acestui sfincter mai este determinată și de influențele vagale care eliberează din neuronii intercalari NO și VIP. Menținerea închisă a cardiei primează mucoasa esofagiană de acțiunea corozivă a acidului clorhidric. Refluxarea conținutului gastric în esofag ca urmare a deschiderii cardiei se numește reflux gastro-esofagian.

În împiedicarea refluxării conținutului gastric în esofag intervine și un mecanism de valvă a segmentului esofagian intraabdominal. Presiunea crescută intraabdominală turtește esofagul subdiafragmatic și în același timp mărește presiunea intragastrică la 5-10 mmHg, iar contracția cardiei creează o presiune de 15-30 mmHg. Fără intervenția unui astfel de mecanism, toți factorii care produc creșterea presiunii intraabdominale (tusea, respirațiile profunde etc.) ar împinge conținutul gastric în esofag. Nou-născutul nu prezintă segmentul esofagian intraabdominal, de aceea are o tendință de regurgitare a alimentelor ingerate. Stimularea vagului determină contracția esofagului și relaxarea cardiei. De asemenea, concentrațiile ridicate de progesteron din sângele gravidelor sau al femeilor ce folosesc anticoncepționale orale care conțin progesteron reduc tonusul cardiei cu apariția refluxului gastro-esofagian.

9.2.1.6. Reglarea deglutiției

Controlul procesului de deplasare al bolului alimentar din cavitatea bucală, prin faringe și esofag, până în stomac este realizat în principal prin mecanisme nervoase și într-o mică măsură prin mecanisme umorale.

Controlul nervos al deglutiției:

a) **Aferențele implicate în deglutiție.** Fibrele senzitive, de la nivelul palatului, pilierilor, vălului palatin, luei, faringelui, epiglotei sunt conținute în trei nervi: trigemen (ramura maxilară), glosafaringian și nervul laringeu superior. O singură stimulare electrică a nervului laringeu superior este suficientă pentru declanșarea deglutiției (frecvența optimă de stimulare 20-30 Hz). Nu se descriu fusuri neuro-musculare tipice pentru mușchii deglutiției, sunt prezente câteva terminații mai mult sau mai puțin spiralate și neîncapsulate (fig. 9.10).

Fibrele senzitive esofagiene împrumută traiectul nervilor simpatici, cei mai numeroși împrumută calea vagală. Fibrele senzitive de origine esofagiană sunt fibre mielinizate de grup B. Cele mai multe dintre ele sunt conectate cu mecanoreceptorii de adaptare lentă localizați în musculoasă și activați de distensia pasivă sau contracția esofagului. Mecanoreceptorii cu adaptare rapidă (localizați în seroasă) sunt răspunzători de descărcări de tip „in-off”.

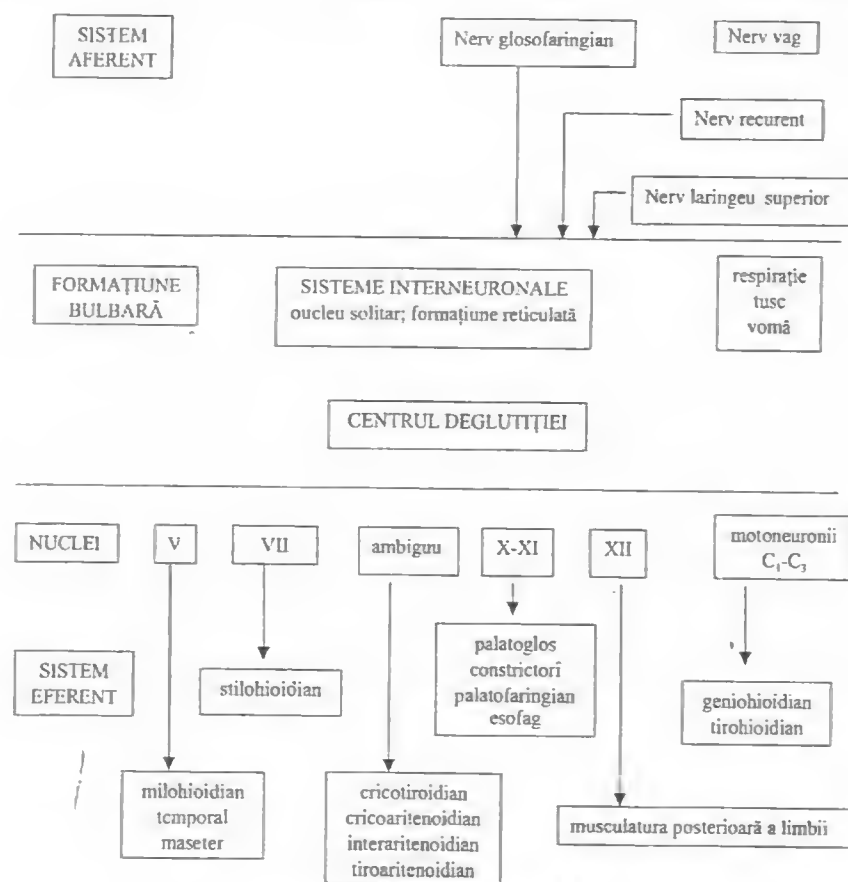


Fig. 9.10. Reglarea nervoasă a deglutiției.

În timpul peristaltismului esofagian, mecano-receptorii prezintă o activitate fasică; descărcarea fiind crescută în momentul înghițirii bolului alimentar față de înghițirea salivei (fig. 9.10).

b) *Centrul deglutiției.* Circuitele strict necesare deglutiției sunt conținute în rombencefal. Acest centru rombencefalic poate fi împărțit în 3 etaje:

- un etaj senzitiv (aferent), care corespunde traiectului central al aferențelor implicate în deglutiție;
- un etaj motor (eferent), care conține motoneuronii și neuronii preganglionari puși în acțiune în cursul deglutiției;

- un etaj integrator, format dintr-o rețea interneuronală responsabilă de organizarea secvenței motrice a deglutiției. Această rețea interneuronală determină o activitate succesivă și paralelă, care persistă și în absența fenomenelor de reaferențare (descărcarea aferențelor în cursul deglutiției). Ea este localizată în bulbul rahidian și împărțită în 2 grupuri: (1) un grup dorsal corespunzător fascicului solitar și reticular subiacent. Acest grup conține 2 categorii de neuroni: precoci, tardivi sau foarte tardivi. Interneuronii precoci

au activitate înainte de debutul deglutiției ceea ce sugerează că ei pot fi implicați în declanșarea acestui act; (2) un grup ventral, situat în jurul nucleului ambiguu. Acești interneuronii sunt similari cu cei din grupul dorsal și sunt situați în aval de aceștia. Lezarea interneuronilor dorsali suprimă programul de deglutiție a interneuronilor ventrali.

Rețeaua interneuronală a grupului dorsal elaborează programul de deglutiție, iar cea a grupului ventral distribuie acest program la diverse grupuri de interneuroni. Programul de deglutiție poate fi pus în acțiune prin intermediul informațiilor seozitive provenite de la zonele reflexogene periferice sau de la centrul superior. Acest program este, în condiții fiziologice, ajustat constant în funcție de mărimea bolului alimentar transportat. O caracteristică importantă a rețelei interneuronale programatoare este polarizarea funcțională care presupune existența conexiunilor inhibitoare între neuroni (pot constitui „linia de trezire” responsabilă de secvența contractilă a deglutiției).

Punerea în funcțiune a centrului deglutiției. Deglutiția poate fi reflexă sau centrală. Declanșarea voluntară a deglutiției implică interjecția centrilor superiori și, în principal, a cortexului cerebral. Stimularea corticală este capabilă să inducă selectiv deglutiția. Zona corticală eficientă este situată în regiunea frontală; ea trebuie stimulată interactiv pentru a declanșa deglutiția. Influxul corticofug ajunge la interneuronii dorsali, producând o activare cu latență redusă pentru interneuronii dorsali precoci sau cu o latență mare pentru interneuronii dorsali tardivi. Răspunsuri similare au fost observate și la nivelul interneuronilor ventrali precoci, dar latența este întotdeauna mai mare. Interneuronii foarte tardivi nu prezintă nici o activare inițială în timpul stimulării corticale, deci cortexul este capabil să declanșeze deglutiția și să controleze derularea sa inițială, dar nu și derularea ei ulterioară.

Traiectul căii corticofuge comportă una sau mai multe sinapse între mezencefal și bulb. Între cortex și mezencefal fibrele corticofuge traversează capsula internă, regiunea subtalamică, substanța neagră pentru a ajunge la zona reticulată mezencefalică între lemniscul median și fasciculul longitudinal median. La nivelul punții, calea corticofugă poate împrumuta zona reticulată ventrală sub nucleul motor al nervului V. În afară de cortex și de calea corticofugă și alte regiuni corticale par a fi implicate în controlul deglutiției: nucleul amigdalian și hipotalamusul lateral. Există interacțiuni între centrul masticăției și al deglutiției: deglutiția este puternic inhibată în timpul masticăției și facilitată după ce aceasta încetează.

Funcționarea centrului deglutiției. Se realizează ca urmare a programului central; cu alte cuvinte, ca urmare a funcționării rețelei interneuronale al cărei aranjament conduce excitația în toată rețeaua ducând la punerea în acțiune secvențială a diversilor motoneuroni.

Independent de aferențele care declanșează deglutiția, există la nivelul peretelui faringian receptori seozitivi, activați prin distensia intraluminală sau de contracția organului. Acești receptori descarcă impulsuri atunci când are loc deglutiția. Mesajele senzitive au ca efect creșterea descărcărilor diferitelor interneuroni precoci, tardivi și foarte tardivi la etajul integrator al centrului deglutiției. Rețeaua neurooală a deglutiției este polarizată funcțional, astfel încât activitatea segmentelor distale implicate în deglutiție este blocată atunci când segmentele proximale sunt puse în funcțiune datorită existenței conexiunilor centrale inhibitoare între diferitele grupuri de interneuroni. Aceste conexiuni au rol foarte important în mecanismul deglutiției; se poate spune că inhibiția este urmată de o excitație postinhibitoare legată de fenomene de *rebound*. Activitatea succesivă a diferitelor interneuroni programatori poate determina o succesiune de rebound-uri postinhibitorii.

c) *Eferențele implicate în deglutiție.* Aceste eferențe sunt constituite din axoni ai neuronilor al căror corp celular este situat la diverși nuclei motori rombencefali și sunt reprezentați de: nervul trigemen, facial, hipoglos, nucleul ambiguu, vag. Contribuția oervilor V și VII este modestă (înervază mușchii milohioidian, digastric anterior și pterigoidian – nervul V, și mușchiul digastric posterior și stilohioidian – nervul VII). Nucleul nervului XII este cel mai important (înervază mușchii linguali și sublinguali). Nucleul ambiguu este cel care furnizează un contingent motor foarte important, asigurând înervarea faringelui, laringelui și a musculaturii striate a esofagului. Fibrele ce pleacă de la acest nucleu împrumută în cvasitotalitatea lor calea oervului vag și o parte din cea a nervului glosfaringian.

În ceea ce privește eferențele esofagiene de la musculatura netedă, majoritatea corpurilor celulare sunt situate la nivelul nucleului nervului X, altele sunt situate în nucleul ambiguu, precum și în substanța reticulată ce separă cei 2 nuclei.

Componenta umorală intervine în timpul esofagian și privește influențele exercitate asupra sfincterului esofagian distal.

9.2.2. DIGESTIA GASTRICĂ

Etapa gastro-intestinală ocupă un loc central în procesul de digestie al alimentelor, ea fiind atât sediul unor puternice acțiuni enzimatice (proteolitice, lipolitice și amilolitice), cât și al transformărilor mecanice ce pregătesc chimul digestiv în vederea procesului de absorbție.

Stomacul este un organ cavităar ce se află între esofag și intestin, în care alimentele, după un timp mai mult sau mai puțin îndelungat de depozitare, în funcție de natura lor fizico-chimică, se amestecă cu sucul gastric și sunt pregătite chimic și mecanic pentru evacuarea fracționată în duoden.

În esență, transformările suferite de alimente în stomac sunt rezultatul acțiunii enzimatice a secreției gastrice și a motilității stomacului.

Suprafața mucoasei stomacale este tapisată cu glande gastrice, îndeosebi fundul și corpul gastric conținând glande tipice care secretă constituenții principali ai sucului gastric.

Porțiunea orizontală, în care stratul muscular este bine reprezentat, are un rol major în procesul de amestecare a alimentelor cu sucul gastric și de constituire a chimului.

Peretele stomacului respectă structura generală anatomică a tubului digestiv, fiind format din patru straturi: mucoasă, submucoasă, musculară și seroasă, dar prezintă și o serie de particularități ce vor fi prezentate mai jos.

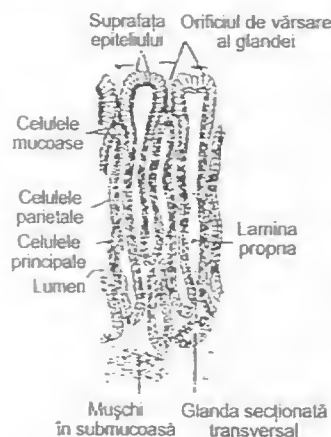


Fig. 9.11. Secțiune prin mucoasa gastrică din regiunea corpului stomacului.

Astfel, glandele gastrice propriu-zise din regiunea corpului și fundului stomacului prezintă în constituția lor patru tipuri de celule (fig. 9.11):

- celule mucoase, din regiunea gâtului glandelor, care secretă mucus;
- celule oxintice sau parietale, situate în cea mai mare parte în jumătatea superficială a glandelor fundice, ce produc acidul clorhidric; aceste celule sunt bogate în mitocondrii, care furnizează energia necesară concentrării de peste un milion de ori a ionului de H^+ preluat din mediul intern;
- celule principale ale corpului sau celule zimogene, care sunt situate în cele 2/3 profunde ale glandei, secretă pepsină și, probabil, renina gastrică;
- celule endocrine reprezentate de: celule enterocromafine, care secretă serotonină, dispuse mai ales la nivelul antrului și duodenului; celule argirofile, care conțin somatostatina, histamină, dopamină și enkefaline; celule care secretă enteroglucagon; celule enterocromafin-like, prezente în mucoasa fundică, ce secretă probabil catecolamine; celule G, dispuse în regiunea antrală, ce secretă gastrină, ACTH, endorfine, enkefaline.

Pătura musculară circulară a stomacului este mai bine dezvoltată decât cea longitudinală, fibrele acesteia din urmă fiind prezente mai ales în părțile anterioară și posterioară ale organului. Sfincterul piloric este alcătuit în principal de fibre circulare.

9.2.2.1 Secreția gastrică

Principalul produs de secreție al stomacului este sucul gastric eliberat de glandele fundice și cardiale ale mucoasei gastrice.

Sucul gastric este un lichid cu o puternică reacție acidă.

Cantitatea totală secretată în 24 de ore este în medie de 1 500 ml. Densitatea sucului gastric este cuprinsă între 1,002–1,009. La adult, pH-ul sucului gastric are valoarea cuprinsă între 0,9–1,5, iar la vârsta de un an 5,8–4,4. Sucul gastric conține 99% apă și 1% substanțe solide, din care 0,6% substanțe anorganice și 0,4% organice.

Conținutul sucului gastric normal este reprezentat de:

Cationi: Na^+ , K^+ , Mg^{2+} (pH aproximativ 1,0).

Anioni: Cl^- , HPO_4^{2-} , SO_4^{2-} .

Pepsine: I–III.

Gelatinază.

Mucus.

Factor intrinsec.

Apă.

Cea mai importantă substanță anorganică este acidul clorhidric. În afara acestuia, sucul gastric mai conține *ClNa*, *ClK*, fosfat de calciu și, în măsură mai redusă, bicarbonat de sodiu, mai ales în sucul glandelor pilorice și cardiale.

Acidul clorhidric se găsește în proporție de 1,8–2,3 g/l, din care 0,7–1,4 g/l sub formă liberă și aproape 1 g/l combinat.

Împreună cu acizii organici: lactic, butiric și carbonic, HCl asigură aciditatea totală a sucului gastric.

Mecanismul de formare al acidului clorhidric este localizat, după Hollander (1962), la nivelul celulelor oxintice (fig. 9.12); ele efectuează un lucru impresionant, care necesită consum energetic.

Celulele oxintice (parietale) secretă o soluție electrolitică conținând maximum aproximativ 160 milimoli de HCl la litru de suc gastric. Această soluție are un pH în jur de 0,8, ceea ce indică o puternică aciditate, ionul de H^+ fiind în concentrație de aproximativ 3 milioane de ori mai mare față de cea din sângele arterial. Mecanismul de transport al H^+ necesită în aceste condiții consumul unei energii de peste 1 500 calorii la 1 litru de suc gastric.

Analizând topografia și structura celulelor oxintice, se observă că acestea conțin un sistem de canaliculi intracelulari. Acidul clorhidric este format la nivelul membranei canaliculilor, fiind apoi condus la exterior.

Etapile de formare a HCl sunt următoarele: la nivel intracelular ionii de H^+ rezultați din metabolizarea glucidelor sau din ionizarea apei sunt preluați de sistemele respiratorii de transport (*flavoprotein-citocrom*) în vederea combinării cu oxigenul activat. Din reacția cu O_2 activat rezultă apa, care disociază, generând OH^- ce este reținut în celulă și H^+ care este transportat activ în sistemul de canalicule excretorie la schimb cu ionii de K^+ în prezența H^+ , K^+ -ATPazei.

Pentru fiecare moleculă de H^+ secretată de stomac se reține în celula oxintică o moleculă de OH^- ; prin reacția dintre CO_2 (produs de metabolismul celular oxintic) și apa intracelulară, în prezența anhidrazei carbonice, se formează acid carbonic, ce disociază în H^+ și anionul bicarbonic HCO_3^- . Ionul de H^+ va

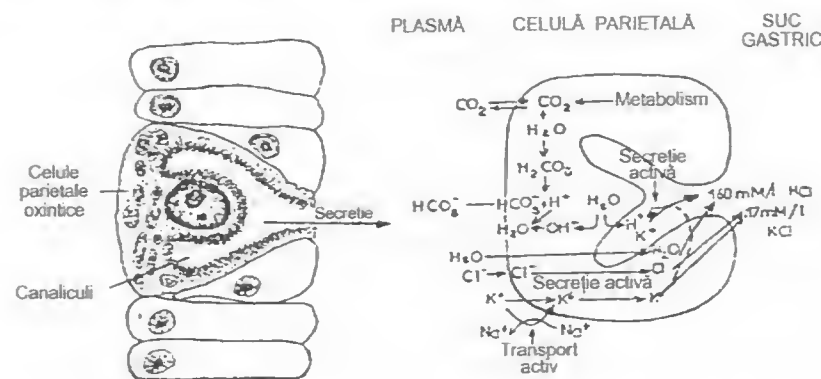


Fig. 9.12. Teoria protonică a formării acidului clorhidric.

Fig. 9.13. Mecanismul secreției HCl de către celulele parietale gastrice.

reforma împreună cu ionul OH^- obținut anterior apa, în timp ce anionul bicarbonic va fi trecut prin polul bazal în sânge, formând aici bicarbonatul, care determină alcalinizarea plasmăi din cursul digestiei gastrice proporțional cu cantitatea de acid secretată (fig. 9.13).

Deplasarea în plasma sanguină a anionului HCO_3^- are loc prin intervenția unei pompe $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ la schimb cu ionul de Cl^- , care trece activ din citoplasma celulelor oxintice în secreția gastrică; urmează combinarea anionului Cl^- cu H^+ trecut anterior, rezultând HCl , și a altor cantități de Cl^- cu ionul de K^+ , formând ClK .

Trecerea anionului Cl^- în secreția gastrică creează un potențial negativ de $(-40 \text{ mV}) - (-70 \text{ mV})$ în canaliculi, ce favorizează difuziunea pasivă a ionului de K^+ încărcat pozitiv, din citoplasmă oxintică în canaliculi.

Transportul de Cl^- are loc și în condițiile în care secreția de H^+ este stopată, ducând la concluzia că deplasarea acestui ion se face printr-un mecanism dublu, dependent și independent de secreția H^+ .

Apa trece din celulele oxintice în canaliculi prin osmoză.

Rezultă o soluție finală care conține HCl în concentrație de 100 milimoli la litru și ClK în concentrație de 17 milimoli la litru.

Formarea secreției gastrice este înalt dependentă de energia metabolică. Transportul hidrogen-ionilor împotriva unui gradient de concentrație de trei milioane de ori mai mare necesită o amplă sursă de energie, pentru care este necesar un substrat metabolic adecvat. Numeroși cercetători apreciază că energia necesară transportului H^+ -ionilor este preluată din scindarea ATP.

O altă ipoteză, ipoteza „redox” (Walsh, 1973), presupune că energia din reacțiile de oxido-reducere ce au loc în afara mitocondriei este folosită direct pentru translocarea și deplasarea H^+ . Acest proces ar fi similar mecanismului chimio-osmotic din cursul formării gradientului protonic în mitocondrie în cursul respirației celulare.

Rolul acidului clorhidric este de a denatura proteinele și de a le pregăti pentru acțiunea proteolitică a pepsinei și catepsinei. De asemenea, transformă Fe^{3+} în Fe^{2+} absorbabil, stimulează eliberarea de secretină (hormon intestinal) în contact cu mucoasa duodenală și exercită un efect bactericid.

Dintre substanțele organice conținute în suc gastric enzimele sunt cele mai importante. Acestea sunt: *pepsina*, *catepsina*, *labfermentul*, *lipaza gastrică*, *lizozimul* și *ureaza*.

Principala enzimă a sucului gastric este *pepsina*, o enzimă de tip proteazic secretată de către celulele principale ale glandelor fundice sub formă de proenzimă, numită pepsinogen. Acesta trece spontan în pepsină la un pH sub 6, procesul realizându-se în faze intermediare, în parte reversibile și dependente de pH, prin desprinderea unui peptid sub influența HCl și a unor mici cantități de pepsină. Pepsinogenul este precursorul celor trei tipuri de pepsină existente în suc gastric. Biosinteza pepsinogenului, mai exact a grupelor de pepsinogeni (PG I, PG II), se realizează pe căile cunoscute ale sintezei proteice intracelulare. După sinteză, moleculele de pepsinogen sunt depozitate în granule secretoare, de unde vor fi eliberate în cavitatea gastrică, iar o fracțiune redusă va fi descărcată în sânge prin polul bazal al celulelor secretoare. Activitatea pepsinogenică poate fi astfel depistată în plasmă și urină, în cea din urmă prin dozarea uropepsinogenului.

Toți factorii care favorizează creșterea secreției gastrice acide acționează în general și eliberarea de pepsină (gastrina, secretina; histamina, hiperghlicemia insulinară).

Pepsinele sunt endopeptidaze ce hidrolizează protinele, solubilizându-le mai întâi sub formă de acid-albumine și apoi scindându-le în albumoză și peptone, polipeptide cu șase resturi de aminoacizi; nucleoproteinele sunt separate în acizi nucleici și proteine, în timp ce keratinele, protaminele și mucina nu sunt atacate.

O altă enzimă proteolitică este *catepsina*, care participă la digestia proteinelor numai la sugar, unde suc gastric este slab acid. Considerată până acum ca o unitate specifică, s-a dovedit că este de fapt o fracție de pepsinogen.

Labfermentul, denumit și *presură* sau *renină gastrică*, produce coagularea laptei prin mecanismul precipitării cazeinogenului solubil, pe care-l transformă în cazeină și paracazeină în prezența Ca^{2+} . La omul adult se găsește în cantitate mică și acționează la un pH optim de 4,5–5,5. Coagulul cuprinde particule grăsoase și separă un lichid restant, lactoserum, în compoziția căruia intră substanțe minerale, lactoză și proteine necoagulate (lactoalbumine și lactoglobuline), care sunt atacate de pepsină. Separarea laptei, sub acțiunea sa, în două fracțiuni, una solidă, care rămâne în stomac, și alta lichidă, evacuată rapid în intestin,

reprezintă un fenomen de adaptare care permite stomacului de sugar să primească o cantitate de lapte apreciabilă în raport cu volumul acestuia, ingerat în 24 de ore de-a lungul celor aproximativ opt mese.

În prezent, existența enzimei este contestată atât la sugar, cât și la adult, toate enzimele proteolitice gastrice având capacitatea de a coagula laptele.

Lipaza gastrică este o enzimă întâlnită doar în stomacul copilului, activă la pH 5,5 și inactivă în mediu mai acid. Ea acționează asupra trigliceridelor ce conțin acizi grași cu lanț lung, eliberând cantități mici de acizi grași și gliceride parțiale. La sugar, enzima hidrolizează 25% din lipidele laptei.

Gelatinaza scindează gelatina, o proteică componentă a țesutului conjunctiv.

Lizozimul, asemănător celui produs în secreția salivară, scindează glucidele, acționând optim la pH de 5,3.

Ureaza gastrică este un produs al celulelor mucoase și al bacteriilor din suc gastric, acțiunea ei de scindare a ureei, fiind minoră.

Ureea disponibilă pentru hidroliză intră în contact cu enzima când apa traversează mucoasa gastrică în timpul secreției gastrice. Rezultă că în timpul secreției acide o mică cantitate de uree este hidrolizată în mucoasă, produsele rezultate fiind alcaline: două molecule de amoniac pentru o moleculă de CO_2 .

Cantitatea de amoniac formată fiind egală numai cu 1/500 părți din cantitatea de acid secretată, hidroliza ureei nu contribuie la neutralizarea acidului la starea normală, în afara cazului când se ingeră mari cantități de uree (15–25 g), neutralizarea putând ajunge până la jumătate din activitatea gastrică.

Sucul gastric mai conține și *factorul intrinsec* secretat de om de glandele fundice și care este o mucoproteină cu greutate moleculară de 53 000. Factorul intrinsec favorizează absorbția vitaminei B_{12} (factorul extrinsec), indispensabilă eritropoiezei. Vitamina B_{12} (ciancobalamina) se fixează pe factorul intrinsec, iar complexul vitamină-proteină se deplasează de-a lungul intestinului și aderă la celulele epiteliale de la nivelul ileonului. Rolul factorului intrinsec este de a stimula pinocitoza și de a favoriza absorbția vitaminei. În enterocite, vitamina B_{12} este transferată de pe factorul intrinsec pe transcobalamina II, care o transportă în plasma sanguină.

Când factorul intrinsec lipsește, vitamina B_{12} nu se mai absoarbe și apare anemia pernicioasă.

Existența unei diastaze proteolitice, ca pepsina în suc gastric acid, a pus problema autodigestiei stomacului. Se consideră că rezistența mucoasei gastrice față de acțiunea acidului gastric se datorează fie alcalinității protoplasmice, fie unei acțiuni neutralizante asigurate de secreția unor antifermenți. Acest rol îl are *mucina*, care este o mucoproteină secretată atât de celulele mucoase ale gâtului glandelor fundice, cât și de celulele caliciforme care tapetează mucoasa gastrică. Suprafața stomacului este acoperită de un strat de mucus cu o grosime de 1–1,5 mm, având reacție alcalină sau neutră, cu excepția zonelor de formare a acidului clorhidric.

Stratul mucos exercită atât protecție mecanică, cât și chimică a mucoasei gastrice. Aceasta din urmă se realizează prin capacitatea de a fixa și neutraliza HCl (100 ml mucus neutralizează 40 ml HCl 0,1 N). Pe de altă parte, pepsina care difuzează în stratul de mucus este inactivată prin absorbția de către pH-ul alcalin al mucinei. Iritarea chimică, mecanică, cât și lezarea mucoasei modifică secreția de mucus, conferind protecției exercitate de acesta un caracter dinamic și adaptativ.

9.2.2.2. Reglarea secreției gastrice

Sucul gastric se secretă aproape continuu, în cantitate foarte redusă în fazele interdigestive și cu creștere maximă în cursul digestiei.

Secreția bazală de suc gastric, nestimulată, reprezintă 5–10% din valoarea celei stimulate. Valorile secreției bazale variază între 0–5 mEq/h și reprezintă efectul acțiunii sumate a diferitelor influențe nervoase sau umorale cu rol stimulator sau inhibitor ce se exercită în permanență asupra stomacului.

Tonusul vagal constant ce determină eliberarea continuă de acetilcolină constituie factorul principal care menține secreția gastrică bazală. Influențele nervoase asupra nivelului secreției bazale pot fi dovedite prin studiul subiecților numai cu fistulă gastrică, astfel depresia psihică scade secreția bazală, în timp ce agresivitatea o crește.

Reglarea și adaptarea activității secretorii a stomacului se fac prin control nervos și umoral.

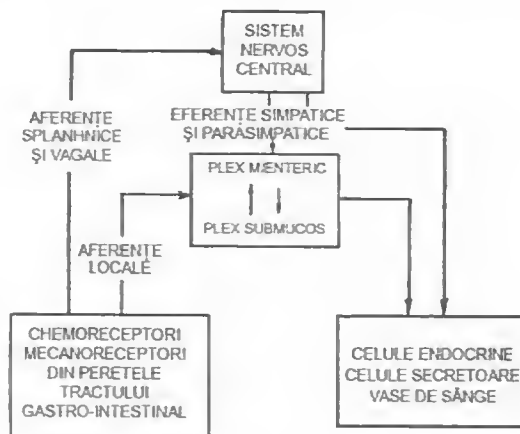


Fig. 9.14. Căile reflexe intrinseci și extrinseci din tractul gastro-intestinal.

Reglarea nervoasă este reprezentată de dublul mesaj informațional care circulă de la periferie pe căi senzitive la centru și, de aici, pe calea nervilor vagi la glandele gastrice, realizând un răspuns prompt cu o secreție acidă bogată în enzime proteolitice.

Pe calea aferentă senzitivă sosesc semnale de la receptorii optici, auditivi, gustativi, precum și de la mecanoreceptori și chemoreceptori din stomac și intestin, mesaje ce sunt trimise nucleului dorsal al vagului din bulb. De aici, calea eferentă urmează calea fibrelor parasimpatice preganglionare și postganglionare ce pun în libertate acetilcolina la nivelul terminațiilor.

Mediatorul parasimpatic acționează atât direct asupra celulelor parietale oxintice, stimulându-le, cât și indirect, favorizând eliberarea în circulație la nivelul mucoasei antrului piloric a unui hormon numit *gastrină*.

Activitatea secretorie, ca, de altfel, și cea motorie, a stomacului este în permanență controlată de sistemul vegetativ parasimpatic ca principal agent stimulator. Aferențele și eferențele acestui sistem asigură reflexe gastrosecrete lungi, vago-vagale, și scurte, colinergice intramurale.

Sistemul simpatic, mai puțin important, participă la coordonarea activității secretorii a stomacului, având un rol inhibitor asupra acesteia, atât prin acțiune directă asupra celulelor parietale secretoare, cât și indirect, prin influențarea motricității vasculare și, deci, a fluxului sanguin din mucoasa gastrică. Simpatismul deține în același timp și o funcție trofică, stimulând diferențierea celulară și regenerarea mucoasei gastrice (fig. 9.14).

Reglarea neuro-umorală a secreției gastrice cunoaște trei faze, și anume: *cefalică*, *gastrică* și *intestinală*.

Faza cefalică se realizează prin mecanisme reflex condiționate și reflex necondiționate, la care se adaugă componenta umorală.

a) *Mecanismul reflex condiționat*, denumit și faza psihică, este declanșat de un complex de factori care pot acționa separat sau asociat ca, de exemplu: excitații vizuale, olfactive și auditive legate de pregătirea mesei, discuții sau chiar numai gândul referitor la anumite mâncăruri preferate, cronologia orelor de masă, obiceiuri alimentare, condiționarea la un excitant natural ori artificial asociat în prealabil cu alimentarea etc. Apare astfel un complex de senzații care dau naștere apetitului ce declanșează secreția gastrică condiționată, în care un rol principal îl are scoarța cerebrală, de la care pleacă impulsuri stimulatorie spre nucleul dorsal al vagului (fig. 9.15) prin intermediul hipotalamusului, inițiind secreția psihică. Vagotomia abolește răspunsul gastrosecretor.

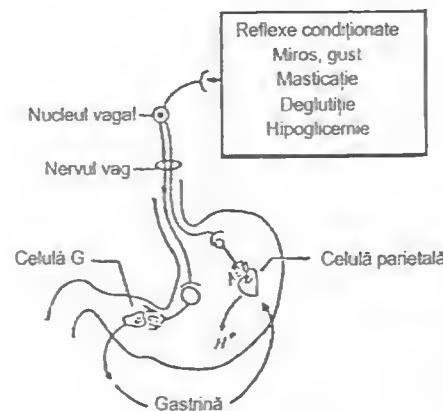


Fig. 9.15. Reglarea secreției gastrice în faza cefalică.

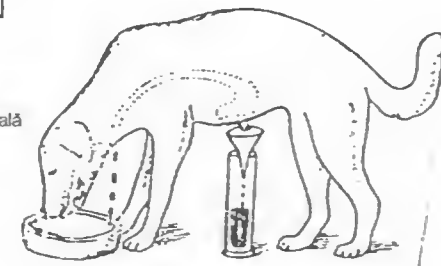


Fig. 9.16. Experiența prânzului fictiv demonstrat de Pavlov.

Anumite stări psihice influențează secreția gastrică. Aceste aspecte au fost observate pe subiecți cu fistule gastrice permanente. Emoțiile și stările depresive scad secreția de suc gastric, în timp ce comportamentul ostil și agresiv o stimulează.

b) *Mecanismul reflex necondiționat*: prezența alimentelor în cavitatea bucală, gustul, masticția și deglutiția lor determină reflex secreția gastrică prin excitarea receptorilor buco-faringieni, de la care impulsurile urmează calea nervilor gustativi spre centrul bulbar reprezentat de nucleul dorsal al vagului. Calea eferentă a arcului reflex este reprezentată de nervii vagi.

Mecanismul nervos reflex de stimulare a secreției gastrice pe calea reflexelor condiționate și necondiționate a fost demonstrat de I. P. Pavlov pe animale cu fistulă dublă, esofagiană și gastrică (fig. 9.16).

În cursul masticției și deglutiției, deși alimentele nu ajung în stomac, aceste animale prezintă o creștere a secreției gastrice ce este abolită de vagotomie.

În timpul fazei cefalice există și o participare *umorală* (vezi fig. 9.15) reprezentată prin acetilcolină și gastrină, imediate pe cale vagală (prânzul fictiv determină un puternic răspuns secretor al micului stomac Heidenheim, denervat vagal). Vagul exercită și o acțiune stimulatorie directă asupra celulelor secretoare, demonstrată prin faptul că secreția de suc gastric la nivelul micului stomac Pavlov (pungă stomacală derivată, cu inervația vagală păstrată) are loc în cazul administrării prânzului fictiv, chiar dacă animalelor li s-a extirpat în prealabil antrul piloric eliberator de gastrină.

Secreția gastrică este influențată și de impulsuri ce sosesc la centrul bulbar, de la sistemul limbic, hipotalamus și alți centri nervoși superiori.

Stimularea sistemului limbic și a hipotalamusului anterior mărește activitatea eferentă vagală și, implicit, secreția gastrică.

Hipoglicemia insulinară are efect analog, probabil prin acțiune directă asupra hipotalamusului, efect ce este abolit de vagotomie și atropină. Excitarea hipotalamusului posterior determină o secreție gastrică acidă, tardivă, neinfluențată însă de vagotomie, și suprimată numai de dubla suprarenalectomie.

Se pare că hipotalamusul este implicat în două mecanisme secretoare gastrice: unul nervos vagal și altul umoral, ce acționează prin adenohipofiză și corticosuprarenală. Stimularea secreției gastrice acide de către insulină se realizează, de asemenea, prin mecanism central hipotalamic, cu participarea nervilor vagi. Mecanismul intercentral este relevant și de faptul că în faza cefalică stimularea secreției gastrice este obișnuit asociată cu senzația de foame.

Experimental s-a demonstrat, de altfel, că în aceeași regiune hipotalamică, unde se află centrii care controlează ingestia de alimente, se găsesc și centrii care reglează secreția gastrică.

Faza gastrică (necondiționată) este declanșată de pătrunderea și prezența alimentelor în stomac. Ea continuă timp de aproximativ 3-4 ore, interval în care alimentele sunt supuse digestiei gastrice și pregătite pentru evacuare în duoden.

Sucul gastric elaborat în timpul acestei faze este puternic acid și bine reprezentat enzimatic.

Acțiunea sumatoare asupra secreției sucului gastric este determinată de excitarea receptorilor gastrici și distinderea pereților stomacului de către alimente. Pe cale vagală, impulsurile ajung la nucleul vagal bulbar, de unde pleacă comenzi efectoare la glandele secretoare parietale. Mecanismul nervos a fost dovedit experimental prin excitarea mecanică a mucoasei și prin distensia moderată a pungii gastrice principale a modelului experimental Pavlov. În ambele situații este determinată secreția micului stomac, realizat ca o pungă derivată ce păstrează legăturile nervoase cu stomacul propriu-zis. De asemenea, distensia stomacului unui animal cărui i s-a îndepărtat antrul (eliberator de gastrină) declanșează secreția de acid și pepsină. Toate aceste răspunsuri sunt mult reduse după vagotomie. Abolirea completă are loc numai după administrarea de atropină, ceea ce sugerează că, pe lângă reflexul lung de tip vago-vagal, mecanismul nervos este completat cu un reflex local colinergic determinat de plexurile intramurale (fig. 9.17).

Reglarea umorală a secreției gastrice este împletită întotdeauna cu cea nervoasă și este reprezentată mai discret în faza cefalică, intensificând în schimb puternic secreția în faza gastrică.

Funcționarea celulelor parietale ale stomacului este modulată de trei clase de reglatori umorali: cei aduși de circulația sanguină, cei eliberați local la nivelul terminațiilor nervoase și cei eliberați de mucoasă, din care difuzează apoi spre celulele parietale prin spațiul extracelular.

Acetilcolina este eliberată la nivelul terminațiilor parasimpatice în imediata apropiere a celulelor parietale gastrice și a celulelor musculare prin mecanisme reflexe lungi și scurte (locale). La nivelul peretelui gastric, sistemul colinergic nu este singurul prezent, el intrucându-se cu mediatori peptidergici (substanța P, VIP), purinergici (ATP), prostaglandinici, a căror prezență a fost dovedită imunohistochimic.

Acetilcolina eliberată la nivelul celulelor parietale efectuează le stimulează pe acestea direct prin cuplare pe receptorii muscarinici, având ca efect final creșterea secreției de hidrogen-ioni. O altă cale de acțiune a acetilcolinei este cea de stimulare a eliberării de gastrină și probabil de histamină.

Acetilcolina este un stimul puternic pentru auziți compoziți, cum sunt pepsina și factorul intrinsec. În mecanismul secretor colinergic al celulelor parietale un rol important îl joacă calciul, stimularea colinergică a acestor celule fiind cuplată cu creșterea influxului de calciu extracelular.

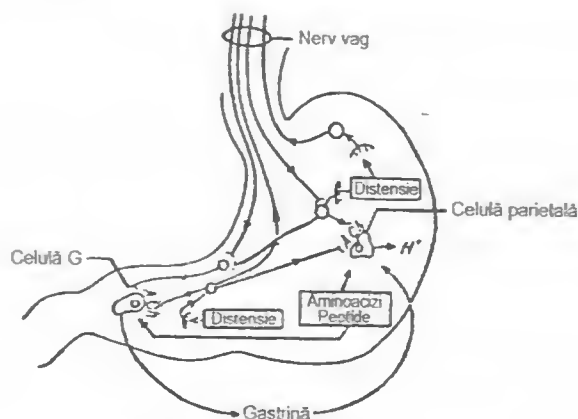


Fig. 9.17. Reglarea secreției gastrice în faza gastrică.

Așa după cum este cunoscut, calciul este un veritabil mesager secundar intracelular care, împreună cu nucleotidele ciclice, ar regla activitatea unor importante enzime: anhidraza carbonică, protein kinaza și fosfodiesteraza.

Gastrina este unul din cei mai bine studiați hormoni gastro-intestinali a cărei acțiune a fost evidențiată în 1906, de Edkins, prin stimularea mucoasei antrale.

În 1964, Gregor și Tracy izolează un polipeptid din antrul gastric, iar Mc Guigao identifică celulele G secretoare de gastrină.

Deși este eliberată predominant de antrul piloric, cantități mici de gastrină au fost găsite și în regiunea cardiacă.

O activitate gastrin-like are și intestinul subțire, și chiar colonul.

Au fost izolate chimic și funcțional trei tipuri de gastrine: *big-gastrina*, formată din 34 de aminoacizi, *little-gastrina*, cu 17 aminoacizi, și *mini-gastrina*, cu 14 aminoacizi.

Gastrina 17 este cea mai activă formă a gastrinei circulante și pare a fi cel mai important component în cadrul reglării umorale a secreției gastrice.

Structura G_{17} și G_{34} este următoarea:

G_{34}

pGlu-Leu-Gly-Pro-Glu-Gly-Pro-His-Leu-Val-Ala-Asp-Pro-Ser-Lys-Lys-Glu-Gly-Pro-Try-Leu-Glu-Glu-Glu-Glu-Ala-Tyr-Gly-(Try-Met-Asp-Phe-NH₂)

() – partea activă a gastrinei

G_{17}

pGlu-Gly-pGlu-Try-Leu-Glu-Glu-Glu-Glu-Ala-Tyr-Gly-(Try-Met-Asp-Phe-NH₂)

() – partea activă a gastrinei

Gastrina este eliberată în prezența peptidelor, aminoacizilor și calciului prin activare nervosă reflexă și prin acțiunea catecolaminelor circulante și bombesinei (hormon eliberat de mucoasa duodenală).

Eliberarea se face în circulația sanguină de la nivelul celulelor G (secretoare de gastrină) prezente în pilor, antru și duodenul proximal.

Cea mai mare cantitate de gastrină serică este secretată de antru.

Membrana celulelor G este prevăzută cu microvilozități ce posedă receptori atât pentru stimularea, cât și pentru inhibarea eliberării de gastrină.

Pentru activitatea biologică este esențială prezența tetrapeptidului COOH-terminal format din patru aminoacizi diferiți, fracție activă care se găsește și sub formă de preparat comercial (pentagastrina).

Eliberarea de gastrină crește în magnitudine și durată în condițiile menținerii unui pH intragastric mai mare de 3 și, de asemenea, în prezența proteinelor sau aminoacizilor. În privința ultimului aspect, există chiar un raport de proporționalitate între perfuzia intragastrică cu o soluție de peptone la pH constant și cantitatea de gastrină serică.

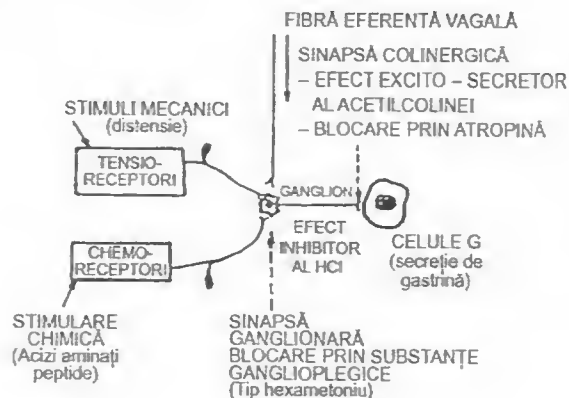
Deși pe parcursul a 24 de ore cantitatea de secreție gastrică este înaltă seara și scăzută dimineața, nu există un paralelism între cantitatea acesteia și concentrația din plasmă.

Cercetările făcute pentru a elucidă mecanismul de secreție al gastrinei au arătat că există cel puțin patru căi de eliberare, și anume: stimularea vagală, distensia gastrică, stimularea umorală și stimularea alimentară.

Există numeroase dovezi experimentale care indică faptul că eliberarea de gastrină de către celulele G din mucoasa antrală este și de natură direct colinergic-receptorială. Astfel, acetilcolina aplicată pe mucoasa antrală stimulează secreția de gastrină chiar dacă antrul piloric este denervat sau transplantat. De asemenea, aplicarea pe mucoasa antrală de anestezice locale (procaină sau cocaină) împiedică consecutiv eliberarea de gastrină, în timp ce acțiunea gastrin-secretoare a acetilcolinei aplicate direct persistă (fig. 9.18).

Se pare, deci, că stimulii mecanici sau chimici pot să-și exercite efectele lor excito-secretoare de gastrină atât prin intermediul receptorilor colinergici ce sunt în legătură cu terminațiile postganglionare vagale și „blocați” de anestezice locale, cât și prin receptori colinergici diferiți de primii, prin intermediul cărora acetilcolina provoacă secreția celulelor G.

Fig. 9.18. Schema mecanismului nervos implicat în secreția gastrinei.



Încă din faza cefalică, aferențele vagale stimulează nu numai activitatea secretorie a glandelor fundice, ci și a celulelor G.

Există dovezi recente ce sugerează că eliberarea vagală a gastrinei s-ar realiza și printr-un mecanism necolinergic cu transmiterea peptidergică și mediat de bombesină (Walsh, 1980).

Distensia locală gastrică, atât cea izolată a antrului, cât și cea a pungii fundice determină, de asemenea, stimularea eliberării de gastrină din antru.

Substanțele ganglioplegice împiedică transmiterea semnalelor date de distensie, ceea ce face să se presupună existența în peretele gastric a unor plexuri nervoase intramurale ce realizează legături între receptorii antrali și celulele G. Mecanismul acestei căi este realizat prin reflexe locale, colinergice, întrucât efectele distensiei sunt blocate de atropină. În acest mod, inervația intrinsecă locală își adaugă acțiunea la cea a aferențelor vagale extrinseci provenite de la regiunile antrale și pilorice, în vederea stimulării secreției de gastrină. Mecanismul fiind colinergic în ambele cazuri, nu este exclusă o cale finală comună.

Pe calea stimulării alimentare se descriu descărcări de gastrină determinate de proteine administrate intragastric. În schimb, în cazul administrării intravenoase sau direct în intestinul subțire a acestora, efectul asupra secreției gastrinei nu mai are loc, cu toate că se înregistrează o creștere a secreției gastrice acide, ceea ce demonstrează mecanismul chimic de acțiune a acestei căi.

Sumarea acțiunii mecanice (distensia) și chimice (proteine) amplifică corespunzător eliberarea gastrinei. Nivelul secreției gastrice ca răspuns la gastrină (200 ml/oră) este mai mic decât la stimularea nervoasă (500 ml/oră), dar durează mai mult (câteva ore), acționând atât timp cât hrana rămâne în stomac.

Stimularea pe cale umorală a gastrinei este realizată și de bombesină și de calciu. Dacă pentru primul factor s-a dovedit realizarea acțiunii sale pe cale vagală peptidergică, pentru calciu mecanismul intim excitator-secretor este încă neelucidat.

Eliberarea de gastrină cunoaște și influențe inhibitoare. Astfel, scăderea pH-ului gastric sub 2,5 este un factor de inhibiție a gastrinei ce afectează îndeosebi nivelurile de solicitare din timpul digestiei și care se constituie ca un veritabil mecanism de retrocontrol.

Eliberarea de gastrină este inhibată și de unii hormoni peptidici: somatostatina, glucagon, secretina, peptidul intestinal vasomotor (VIP), peptidul inhibitor gastric (GIP), colecistokinină (CCK), calcitonină.

În ceea ce privește mecanismul de acțiune al gastrinei, datele de până în prezent sunt controversate, atât cu privire la existența receptorilor pentru gastrină pe celulele parietale, cât și referitor la mediarea intracelulară a acțiunii gastrinice.

S-au propus mai multe căi posibile de acțiune a gastrinei:

a) prin eliberare de acetilcolină la nivelul terminațiilor nervoase, cu acțiune locală a acesteia pe celula organului receptor (celulele parietale și zimogene gastrice);

b) prin eliberare de histamină prezentă, de altfel, în mari cantități la nivelul mucoasei gastrice (sub influența gastrinei ar crește activitatea histidin decarboxilazei și capacitatea de formare a histaminei).

Conform teoriei lui Code (1965), acetilcolina și gastrina stimulează formarea și eliberarea de histamină, aceasta din urmă ca mediator final comun pentru stimularea celulelor secretoare parietale (acțiune în serie).

Un alt model funcțional (Grossman și Kenturek, 1979) admite că acțiunea celor trei mediatori ar fi interdependentă, stimularea unuia crescând sensibilitatea celorlalți doi receptori, iar blocarea unuia diminuând sensibilitatea față de secretagogii specifici la cei neblocați.

Efectele fiziologice ale gastrinei sunt reprezentate de acțiuni multiple, secretorii, motorii și trofice: în cadrul stimulării secreției gastrice, ea crește puternic secreția de hidrogen-ioni și de pepsină; participă alături de pancreozimin-colecistokinină, dar într-o măsură mai mică decât aceasta, la stimularea secreției enzimatice pancreatice; stimulează creșterea mucoasei gastrice, în special a stratului secretor acid prin stimularea sintezei de ARN, ADN și a proteinelor; determină creșterea ușoară a factorului intrinsec; este implicată în reglarea eliberării de insulină; reprezintă un puternic stimulent al musculaturii digestive, îndeosebi al regiunii antrale și, deci, al evacuării gastrice.

Histamina este al treilea mediator al secreției gastrice. Descrisă din 1920, de Popielski, ca având acțiune stimulantă asupra celulelor secretoare ale stomacului, participarea ei la reglarea umorală a activității gastrice s-a dovedit complexă și departe de a fi complet descifrată.

Eliberată din bazofile, mastocite, trombocite și celulele enterocromafine ale sistemului APUD, ea acționează prin intermediul receptorilor H_1 și H_2 la nivelul organelor-țintă. Activitatea glandelor gastrice poate fi influențată atât de histamină adusă pe calea circulatorie generală, cât și de cea eliberată local.

Histamina se eliberează la nivelul unor celule specializate din mucoasa gastrică, probabil printr-un mecanism cAMP-dependent.

Ionii de calciu intervin și ei în producerea histaminei, favorizând eliberarea acesteia.

Așa după cum s-a arătat mai sus, eliberarea de histamină ar fi declanșată de către acetilcolină și gastrină, ca mediatori final comun sau, după alte păreri, ea s-ar secreta în mod continuu, determinând potențarea sensibilității celulelor parietale față de secretagogi. Nu este exclus ca ambele teorii să reflecte adevărul, la nivelul celulelor parietale realizându-se integrarea răspunsului secretor la variate stimulări.

Răspunsul secretor la administrarea de histamină este dependent și proporțional cu masa celulelor parietale. Acest efect este atât de reproductibil, încât se folosește ca test (testul maximal Kay) pentru calcularea masei celulare parietale (MCP).

Histamina crește volumul sucului gastric și secreția ionilor de H^+ care, la rândul lor, determină creșterea debitului clorhidric orar, ambele efecte fiind realizate cu participarea receptorilor H_2 (blocați de ranitidină). Comparativ cu gastrina, efectul histaminic de stimulare a acidității gastrice și producerii de pepsină este mai puternic.

Un alt factor umoral ce acționează asupra secreției gastrice este reprezentat de *prostaglandine*, prezente ca hormoni locali în mucoasa stomacului. Efectul este inhibitor pentru prostaglandinele din grupa E (PGE_1 și PGE_2) și a fost dovedit atât pe micul stomac Pavlov cu inervația păstrată, cât și pe modelul denervat Heidenheim.

PGE_2 scade volumul total de suc gastric, debitul de acid clorhidric și de pepsină. Diminuarea secreției s-ar explica fie prin scăderea formării cAMP (inhibarea activității sau sintezei adenilat ciclazei), fie prin competiție directă cu cAMP.

Faza intestinală: secreția sucului gastric se prelungește și după golirea stomacului, dar la un nivel mai redus. Producerea de suc gastric în această fază este, la rândul ei, reglată nervos și umoral, atât în sens stimulator, cât și inhibitor.

Mecanismul nervos a fost dovedit prin creșterea secreției de suc gastric ca urmare a distensiei duodenale, într-un mic stomac fundic cu inervația păstrată, ca și de suprimarea ei la anestezierea sau atropinizarea mucoasei intestinale.

Totuși, rolul principal în reglarea fazei intestinale îl dețin mecanismele umorale, căci secreția gastrică ce apare după stimularea mecanică sau chimică a duodenului are loc chiar dacă sunt secționate toate legăturile nervoase ale stomacului.

Factorul umoral principal care acționează este gastrina, numită de Grossman gastrina intestinală (1968), secretată de mucoasa duodenală. Acțiunea ei stimuloare a fost dovedită atât experimental, cât și pe pacienți antrectomizați. Alți hormoni intestinali care stimulează secreția acidă a stomacului sunt motilinul și bombesina.

Unele substanțe chimice, cum ar fi acizii, grăsimile și produșii de digestie lipidică, soluțiile hipertone, venite în contact cu mucoasa duodenală au efecte inhibitoare asupra secreției gastrice. Această acțiune se exercită pe căi nervoase insuficient elucidate, dar în care sunt probabil interesate fibre vagale inhibitoare necolinergice și năadrenergice, inervația simpatică și plexurile intramurale.

Principalul mecanism inhibitor este însă cel umoral.

Substanțele enumerate anterior stimulează eliberarea unui hormon din mucoasa duodenală, numit enterogastronă, cu efecte inhibitoare asupra secreției gastrice, realizate probabil prin intermediul secreției și colecistokininei. O substanță cu acțiune asemănătoare a fost extrasă din urina de om (urogastrona).

Aceeași acțiune inhibitoare o au și alți hormoni intestinali, cum sunt somatostatina, secretina, colecistokina, GIP, enteroglucagonul, VIP. Având în vedere acțiunile lor diverse și complexe, ei sunt prezentați separat în capitolul Hormoni gastro-intestinali.

În concluzie, reglarea funcției secretorii a stomacului se realizează prin mecanisme complexe neuro-umorale (fig. 9.19).

SECREȚIA gastrică este sub dublul control

a) NERVOS – Mesajele transmise de la centru prin nervii vegetativi (vag) la GLANDELE GASTRICE
– Secreție acidă, bogată în enzime

b) UMORAL – Mesajul chimic transmis pe cale sanguină → reglarea lentă a secreției acide, de lungă durată

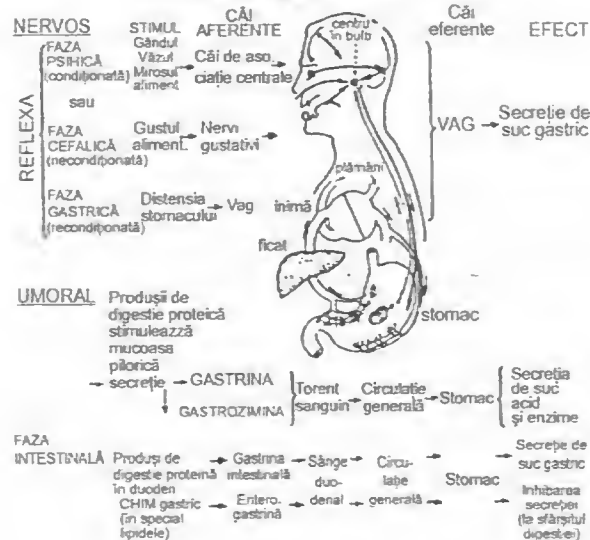


Fig. 9.19. Reglarea secreției gastrice.

Sucesiunea topografică și funcțională a celor trei faze reflexe întreține și adaptează secreția gastrică la necesități. Fazele psihică și cefalică nu durează decât o oră sau două. Sucul rezultat este abundent și foarte activ. Acest suc amorsează și pregătește faza umorală, gastrică și duodenală, al cărei suc mai puțin activ continuă să fie secretat timp de 6-8 ore. Intervenția mecanismelor nervos și umoral se exercită în paralel.

Actele motorii și secretorii, care sunt de origine atât nervoasă, cât și umorală, se asociază pentru a realiza chimul gastric.

Influențele nervoase care intervin asupra secreției gastrice, în afara celor simpatico-parasimpatică, aparțin centrilor superiori corticali, având ca stație intermediară de releu hipotalamusul anterior și posterior.

Asupra secreției gastrice își exercită influența și numeroase substanțe farmacologice. Dintre stimulenți amintim: histamina (cu acțiune periferică), insulina (cu acțiune centrală), acetilcolina (substanță parasimpatotropă).

Substanțele parasimpatolitice care reduc secreția gastrică sunt: beladona și alcaloizii ei, atropina, hiosciamina, precum și anticolinergicele de sinteză, ca bantina și probantina.

Inhibarea secreției gastrice poate avea loc în fiecare din următoarele trei circumstanțe: (a) una din condițiile necesare secreției lipsește – de exemplu, diminuarea debitului sanguin prin adrenalină sau vasopresină; (b) celulele secretore sunt deprimare – de exemplu, de un mediator chimic eliberat de terminațiile nervoase apropiate celulelor; (c) stimularea hormonală sau nervoasă poate fi întreruptă sau redusă.

Toți factorii ce intervin în reglarea activității secretorii a stomacului realizează, în condiții fiziologice, o secreție gastrică adecvată ca volum și conținut stării funcționale a acestuia și caracteristicilor cantitativ-calitative ale alimentelor ingerate.

9.2.2.3. Explorarea secreției gastrice

Se face prin recoltarea sucului gastric cu ajutorul sondelor Einhorn sau Faucher, măsurându-se apoi volumul și dozându-se aciditatea. La animale, recoltarea se poate face și prin fistulă gastrică simplă sau dublă (fistulă gastrică și fistulă esofagiană) sau cu ajutorul micului stomac Heidenheim perfecționat de Pavlov și care permite recoltarea de suc gastric pur.

La om, recoltarea prin fistulă a sucului gastric are loc numai în condiții excepționale (accidental sau postoperator).

În mod curent, se determină în prealabil prin tubajul pe nemâncate (*à jeun*) lichidul gastric de stază, a cărui cantitate în mod normal este de 30-50 ml suc gastric. Se trece apoi, cu ajutorul tehnicii sondajului fracționat, la determinarea sucului gastric obținut după stimularea secreției gastrice. Stimularea se face cu ajutorul prânzurilor de probă (prânzul Ewald-Boas cu alcool sau Leporski). Cel mai frecvent, în prezent, stimularea se realizează prin teste farmacologice care au o valoare clinică superioară metodelor vechi; reprezentate de prânzurile de probă sau proba cu cafeina Katsch și Kalk etc. Se folosește, astfel, testul cu histamină Kay, testul cu insulină Hollander sau teste cu analogi ai histaminei: histalogul sau pentagastrina (Peptavlon).

Exprimarea acidității după titrarea cu NaOH N/10 a sucului gastric se face separat pentru acidul clorhidric liber, combinat și total, în unități clinice Javorski, în grame sau miliechivalenți la litru (mEq/l). Numărul de ml NaOH N/10 care au neutralizat aciditatea liberă, combinată sau totală din 100 ml suc gastric reprezintă unitățile clinice Javorski (valorile normale: HCl liber = 15 U.C., HCl combinat = 25 U.C. și aciditatea totală = 40-60 U.C.).

Cunoscând numărul de ml NaOH N/10 necesar pentru neutralizarea a 100 ml suc gastric, se poate calcula aciditatea în g/l înmulțind numărul de ml NaOH N/10 cu 0,00365 g HCl și apoi cu 10 (1 ml NaOH N/10 neutralizează 0,00365 g HCl).

Valorile normale, pentru acest mod de exprimare sunt: HCl liber = 0,9 g/l, HCl combinat = 1-2,5 g/l și aciditatea totală = 2,5-3,5 g/l.

Aciditatea totală este formată din aciditatea liberă la care se adăugă aciditatea combinată, adică aciditatea legată de mucină sau proteine.

Calculul în mEq/l se poate face știind că 1 mEq HCl conține 0,0365 g HCl; valoarea normală pentru aciditatea totală este de 100-120 mEq/l.

În ultimul timp, exprimarea acidității se face în debit de acid clorhidric (QH^+), sau debit acid orar, care reflectă concentrația hidrogen-ionilor liberi în mEq/l , după formula:

$$\text{QH} = \frac{\text{Vol. suc gastric în ml/h} \times \text{aciditatea titrabilă (mEq/l)}}{1000}$$

Valorile normale sunt de 1,5–2,5 mEq HCl/h pentru secreția gastrică bazală și 20–30 mEq HCl/h pentru cea stimulată.

Dacă aciditatea totală este mai mică decât valorile normale, starea respectivă se numește hipoaciditate, iar dacă le depășește, se consideră hiperaciditate.

Când aciditatea totală lipsește, se utilizează termenul de anaciditate. Lipsa atât a acidității, cât și a pepsinei este cunoscută sub numele de achilie. Scăderea cantității de acid clorhidric este numită hipoclorhidrie, lipsa – aclorhidrie, iar creșterea peste limitele fiziologice – hiperclorhidrie.

O categorie importantă de explorări ale secreției gastrice este cea reprezentată de dozările enzimatiche. Se utilizează, astfel, în examene de finețe: dozarea lactic dehidrogenazei, fosfatazei alcaline, transaminazelor, ureazei, ribonucleazei și, în mod deosebit, activitatea peptică a enzimelor proteolitice prin metoda cu radioiod-serumalbumină (RISA) și metoda cu hemoglobină.

Alte dozări privesc determinarea factorului intrinsec (util în anemia pernicioasă și gastrite atrofică), a gastrinei serice și investigațiile imunologice (anticorpii anticelulă parietală și anticorpii antifactor intrinsec).

Examenul microscopic al sucului gastric normal, extras după prăozul de probă, pune în evidență rare epiteliu cu origine din mucoasa gastrică, rare leucocite normale sau parțial digerate, mucus, rare microorganisme, picături de grăsime și granule de amidon.

Explorări suplimentare gastrice ce pot aduce date indirecte referitoare la secreția gastrică sunt radioscopia, endoscopia și citologia gastrică.

9.2.2.4. Motilitatea gastrică

Stomacul este un organ cavitătar, extensibil, cu capacitate diferită în funcție de specie și individ. La nivelul stomacului are loc depozitarea alimentelor ingerate; omogenizarea lor cu suc gastric și formarea unui amestec semifluid, numit chim, precum și golirea lentă a conținutului său atunci când se deschide sfincterul piloric.

Umplerea gastrică. În momentul în care uoda peristaltică esofagiană ajunge la nivelul cardiei, acest sfincter se relaxează reflex. Această relaxare este urmată de relaxarea fundusului și corpului stomacului, relaxare cunoscută sub numele de relaxare receptivă. Musculatura netedă a fundului și corpului gastric facilitează relaxarea receptivă, realizându-se astfel funcția de rezervor a stomacului. Celulele musculare netede ale fundului gastric au un potențial membranar de repaus foarte scăzut, de aproximativ -50 mV ; la acest potențial celulele musculare netede sunt parțial contractate. Ca răspuns la hiperpolarizarea indusă de impulsurile sosite de la nivelul fibrelor nervoase inhibitorii, celulele musculare netede se relaxează. Vagotomia influențează umplerea gastrică prin diminuarea relaxării receptivă.

Evacuarea gastrică. Odată ajunse în stomac, alimentele sunt amestecate cu suc gastric. Straturile musculare ale fundului și corpului gastric sunt subțiri și, ca urmare, contracțiile de la acest nivel sunt slabe. Ca urmare, conținutul gastric de la acest nivel se va dispune în straturi, în funcție de densitatea componentelor lui. De exemplu, grăsimile se vor dispune la suprafața altor componente alimentare; de aceea, ele vor părăsi cel mai târziu stomacul. Licbidetele se dispun în jurul masei de alimente din stomac și ele vor fi primele care vor părăsi stomacul. Particulele mari sau nedigerabile sunt reținute în stomac o perioadă mai lungă de timp (fig. 9.20).

Golirea gastrică este reglată atât prin mecanisme nervoase, cât și hormonale. Mucoasa duodenală prezintă, pe suprafața sa, receptori care sunt sensibili la aciditate, presiune osmotică și conținutul în grăsimi al chimului gastric.

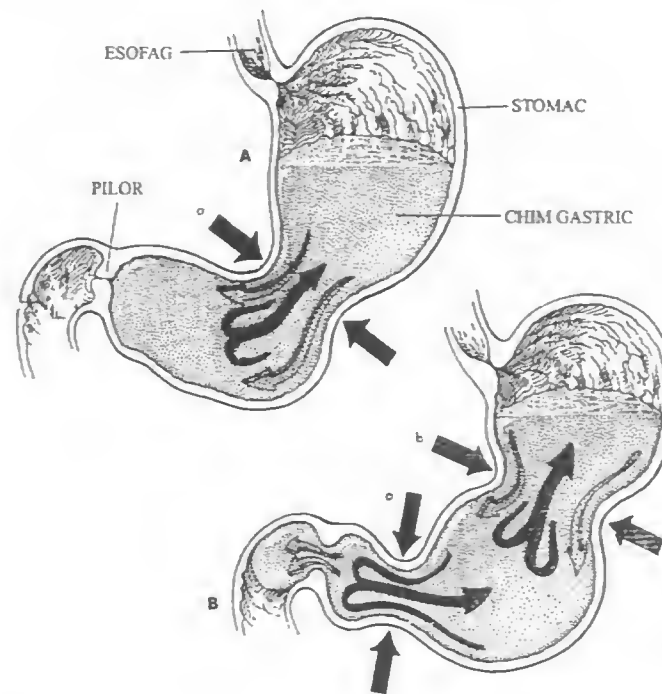


Fig. 9.20. Evacuarea stomacului. A: Undele peristaltice inițiate la nivelul corpului gastric progresează către pilor antrenând faza fluidă a chimului gastric care va trece prin pilor părăsind stomacul (săgeți gri). Faza solidă a chimului, dispusă în centrul stomacului, nu poate străbate pilorul și este împinsă înapoi către corpul gastric unde se continuă digestia (săgeți negre). B: Undele peristaltice suplimentare nrmează aceeași direcție cu undele primare. Chimul fluid este împins prin pilor în duoden, pe când chimul solid este dirijat înapoi către corpul gastric

Prezența acizilor grași sau a monogliceridelor în duoden scade ritmul evacuării gastrice. Chimul care părăsește stomacul este hipertonic și va deveni din ce în ce mai hipertonic pe măsura acțiunii enzimelor digestive din duoden. Soluțiile hipertone din duoden încetinesc golirea gastrică.

Conținutul duodenal cu un pH mai mic de 3,5 întârzie evacuarea gastrică. Prezența aminoacizilor și a peptidelor în duoden încetinește golirea gastrică. În consecință, ritmul evacuării gastrice corespunde ritmului cu care intestiiul subțire poate procesa compușii din chimul gastric.

Scăderea ritmului evacuării gastrice ca răspuns la prezența în duoden a acizilor grași, a pH-ului scăzut sau a hipertonicității conținutului duodenal este reglată prin mecanisme nervoase și umorale.

pH-ul scăzut al conținutului duodeal determină creșterea motilității duodeale. Acest răspuns are o componentă nervoasă vagală (vagotomia determină scăderea acestui răspuns) și una umorală, reprezentată de gastrină și secretină. Gastrina diminuează ritmul golirii gastrice prin inhibarea contracțiilor antrale și stimularea contracțiilor pilorice. Secretina, de asemenea, stimulează producția de bicarbonat a pancreasului.

– Producții de digestie ai lipidelor (acizi grași, monogliceride, digliceride) prezenți în duoden declanșează mecanisme nervoase și umorale care scad ritmul evacuării gastrice. Evacuarea acizilor grași nesaturați din stomac este mai rapidă decât a celor saturați. Componenta umorală a acestui mecanism implică eliberarea de colecistokinină, care va stimula contracția antrului piloric și a pilorului, în acest fel realizându-se scăderea ritmului evacuării gastrice. Prezența acizilor grași în duoden și jejun implică eliberarea de GIP, care are efecte similare cu colecistokinina. Mecanismele nervoase sunt puțin reprezentate.

– Osmolaritatea conținutului duodenal: prezența soluțiilor hiperosmolare în duoden și jejun scade ritmul evacuării gastrice datorită implicării osmoreceptorilor de la acest nivel. Controlul nervos și umoral al acestui fenomen nu este pe deplin elucidat.

– Prezența peptidelor și a aminoacizilor în duoden determină eliberarea de gastrină din celulele G antrale. Gastrina determină creșterea contracției antrale și a constricției sfincterului piloric, diminuând ritmul evacuării gastrice.

Activitatea electrică și mecanică a stomacului. Contracțiile gastrice încep, de obicei, la mijlocul corpului stomacului și se deplasează până la pilor. Forța și viteza acestora crește pe măsură ce se apropie de joncțiunea gastro-duodenală. Procesul de amestecare a alimentelor cu sucurile digestive are loc la nivelul antrului. După ingestia de alimente, contracțiile antrale sunt relativ slabe în intensitate, dar, pe măsură ce digestia înaintază, ele devin din ce în ce mai puternice.

Antrul terminal și pilorul se contractă simultan datorită vitezei de propagare a unde peristaltice. Acest fenomen se numește contracție sistolică a antrului. Undele peristaltice împing conținutul antral către bulbul duodenal, mobilizarea se încheie prin închiderea sfincterului piloric. Datorită diametrului său mic, pilorul se închide la fiecare contracție sistolică a antrului. Contracția puternică a capătului terminal al antrului împinge, cu forță, conținutul antral înapoi, în partea proximală a antrului. Această retroimpulsie determină amestecarea efectivă a conținutului antral cu sucul gastric și ajută la dislocarea mecanică a particulelor alimentare. Activitatea motorie a antrului este variabilă. Astfel, după ingestia de alimente antrul este „liniștit” timp de 1–2 ore, după care are loc o perioadă scurtă de activitate electrică și mecanică intensă, de aproximativ 20 de minute, caracterizată prin contracții puternice ale antrului cu pilorul relaxat. În timpul acestei perioade, particulele mari sau nedigerabile din stomac trec în duoden. Perioada de contracții puternice este urmată de perioada de „liniște” de 1–2 ore. Acest tip ciclic de contracție a stomacului este cunoscut sub numele de complex mioelectric migrator.

Undele peristaltice gastrice sunt generate de „pace-maker-ul” gastric situat pe marea curbă gastrică la mijlocul corpului stomacului. Mușchiul neted gastric are o ritmicitate intrinsecă, generând unde lente cu o frecvență de 3/minut. Gastrina crește frecvența de apariție a undelor lente la 4/minut. Secretina poate diminua frecvența undelor lente. Undele lente gastrice sunt trifazice. Faza de depolarizare rapidă a undelor lente este determinată de intrarea Ca^{2+} în celulă prin canale de Ca^{2+} voltaj-dependente. Faza de platou este determinată de intrarea Ca^{2+} și Na^+ prin canale voltaj-dependente lente. Faza de repolarizare este determinată de o întârziere a creșterii conductanței pentru K^+ (fig. 9.21). Mușchiul neted gastric se contractă atunci când depolarizarea undelor lente depășește pragul de contracție. Cu cât depolarizarea este mai mare și cu cât celula rămâne depolarizată peste pragul mecanic, cu atât este mai mare forța de contracție. Acetilcolina și gastrina stimulează contractilitatea gastrică prin creșterea amplitudinii și duratei fazei de platou. Norepinefrina și neurotensina, care reduc forța contracțiilor gastrice, scad extinderea depolarizării și durata fazei de platou.

La nivelul antrului terminal și al pilorului, undele de depolarizare sunt generate în timpul fazei de platou a undelor lente.

Joncțiunea gastro-duodenală. Pilorul prezintă o musculatură netedă circulară sub forma a două îngroșări înclinate acoperite de un inel de țesut conjunctiv, care-l separă de duoden. Mucoasa, submucoasa și straturile musculare ale pilorului și bulbului duodenal sunt separate, cu excepția câtorva fibre musculare longitudinale care traversează joncțiunea. Duodenul are o activitate electrică de bază mult mai rapidă decât a stomacului (de 10–12 contracții/minut). Bulbul duodenal se contractă neregulat, fiind influențat de ritmurile electrice de bază ale stomacului și ale duodenului postbulbar. Antrul și duodenul prezintă o activitate contractilă coordonată: când antrul se contractă, bulbul duodenal se relaxează.

Joncțiunea gastro-duodenală are rolul:

– de a permite reglarea evacuării gastrice cu un ritm care să permită duodenului să proceseze chimul sosit din stomac;

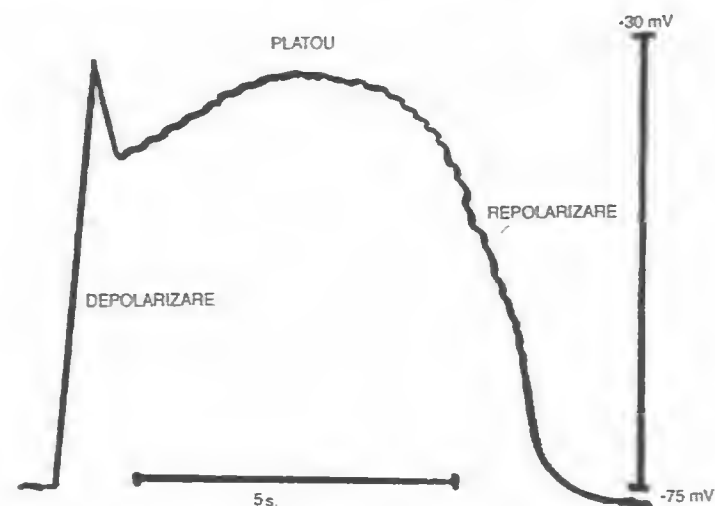


Fig. 9.21. Potențialul de acțiune din mușchiul neted gastric.

– să prevină regurgitarea conținutului duodenal în stomac. O evacuare gastrică prea rapidă poate conduce la ulcer duodenal, pe când regurgitarea conținutului duodenal poate contribui la apariția ulcerărilor gastrice.

Inervația pilorului se realizează atât prin fibre vagale, cât și fibre nervoase simpatice. Fibrele simpatice determină constricția pilorului. Fibrele vagale sunt excitatoare și inhibitoare; fibrele vagale colinergice excitatoare stimulează constricția sfincterului, iar cele inhibitoare eliberează VIP, care determină relaxarea sfincterului.

Voma. Reprezintă expulzia conținutului gastric (și, uneori, duodenal) din tractul gastro-intestinal pe cale bucală. Ea este adesea precedată de o senzație de greață, tahicardie, amețeli, salivare, paloare, midriază și de regurgitații alimentare, în care conținutul gastric este împins în esofag dar nu ajunge în faringe. Voma este reflex comportamental controlat și coordonat de către centrii bulbari. Diverse zone din organism prezintă receptori care furnizează informații centrului bulbar al vomei; de exemplu, distensia stomacului și duodenului este un stimul puternic care poate declanșa voma.

Când reflexul de vomă este inițiat, apar unde retroperistaltice care pornesc de la mijlocul intestinului subțire către duoden, sfincterul piloric și stomacul se relaxează. Inițierea vomei corespunde unui inspir forțat cu glota închisă, care va avea ca efect o scădere a presiunii intratoracice și coborârea diafragmului, care va avea drept consecință creșterea presiunii intraabdominale. Aceasta, împreună cu contracția mușchilor abdominali, va determina conducerea conținutului gastric către esofag. Cardia se relaxează pentru a primi conținutul gastric, iar pilorul și antrul se contractă pentru a preveni fluxul ortograd al conținutului gastric. Prezența conținutului gastric în esofag este însoțită de relaxarea reflexă a sfincterului esofagian superior. Relaxarea este însoțită de mișcări ale osului hioid și ale laringelui, proiectând conținutul gastric din gură în faringe. Intrarea conținutului gastric în trahee este prevenită de apropierea corzilor vocale, închiderea glotei și oprirea respirației.

Substanțele medicamentoase care produc vomă se numesc emetizante și acționează fie reflex, prin iritarea mucoasei gastrice, fie prin influențarea zonei „trigger” (morfină, apomorfina).

9.2.2.5. Reglarea motilității gastrice

Motilitatea gastrică este permanent adaptată solicitărilor digestiei, în funcție mai ales de proprietățile fizico-chimice ale chimului gastric. În perioadele interdigestive, activitatea motorie a stomacului este minimă. Reglarea motricității gastrice este asigurată pe cale nervoasă (reflexă) și pe cale umorală.

Reglarea reflexă extrinsecă. Inervația vegetativă extrinsecă a stomacului este realizată de către nervii vagi și simpatici pe căi aferente și eferente, realizând atât coordonarea motilității gastrice, cât și troficitatea structurilor stomacului.

Fibrele vegetative extrinseci sunt reprezentate predominant de către parasimpatic și în mai mică măsură de către simpatic.

Inervația ambelor sisteme realizează prin fibrele aferente și eferente reflexe digestive lungi, cu centrul în formațiunile superioare ale neuraxului.

Excitarea capătului periferic al vagului toracic crește tonusul, frecvența și amplitudinea contracțiilor stomacului, iar bivaotomia supradiafragmatică predispune la atonie gastrică și spasm piloric. Acest fapt demonstrează că nervii vagi sunt motori pentru stomac și inhibitori la nivelul pilorului, efectele contrarii datorându-se probabil existenței în trunchiul vagal eferent, pe lângă fibrele colinergice, și a fibrelor adrenergice și peptidergice.

Sistemul simpatic exercită efecte inverse, de inhibare a peristaltismului gastric și de tonifiere a sfincterului piloric.

Deschiderea intermitentă a pilorului se realizează astfel sub controlul balansat al celor două sisteme, simpaticul menținând orificiul închis atât timp cât parasimpaticul nu impune evacuarea.

Excitantul fiziologic al activității reflexe motorii gastrice este reprezentat de prezența alimentelor în stomac și de distensia mecanică a pereților stomacali, dublată de acidifierea progresivă a alimentelor.

Parasimpaticul este principalul coordonator al contracțiilor gastrice. O dovadă importantă în favoarea acestei afirmații este faptul că vagotomia bilaterală dezorganizează ritmul electric bazal de origine miogenă, cu unde de contracție de amplitudine și viteze diferite, ce se propagă anarhic, asociate cu scăderea frecvenței și amplitudinii contracțiilor și chiar inițierea de unde antiperistaltice. Simpatetomia farmacologică sau chirurgicală nu influențează motricitatea gastrică, iar efectele stimulării adrenergice se reflectă predominant pe irigație și, în măsură mai mică, pe activitatea secreto-motorie gastrică.

Reglarea reflexă intrinsecă. Faptul că fragmentele de stomac sau de intestin plasate într-un lichid de perfuzie oxigenat continuă să se contracte spontan, precum și reinstalarea evacuării gastrice la un scurt interval de timp după denervare arată că tractul gastro-intestinal posedă în însăși structura sa elementele necesare activității ritmice contractile. Automatismul gastric este realizat atât de plexurile nervoase colinergice Meissner și Auerbach, cât și de proprietatea intrinsecă a musculaturii netede de a se contracta chiar și în absența oricărei inervații. Plexurile mucoase și submucoase au funcție senzitivă, iar cele mienterice predominant motorie.

Arcul reflex segmentar este format din receptori prezenți în pereții gastrici, care, stimulați de chimul gastric, își trimit impulsurile de-a lungul fibrelor aferente prin una sau mai multe sinapse și apoi prin fibrele eferente ale acestora la musculatura netedă.

Stimularea stomacului, al cărui perete a fost în prealabil anesteziat, determină apariția contracțiilor gastrice, demonstrând existența unei reglări periferice prin reflexe intramurale scurte care se integrează în ansamblul funcțional al reflexelor lungi, de asociație, centrale și intercentrale.

Rețeaua plexurilor nervoase intraparietale se află permanent sub influența modulatoră a inervației vegetative extrinseci, fibrele nervoase vago-simpatice făcând sinapsă cu neuronii arcului reflex local. Rolul inervației extrinseci este de a amplifica sau reduce activitatea motorie, ca de altfel și secretorie, a stomacului.

Reglarea activității pompei pilorice se efectuează atât prin semnale ce pleacă din stomac, cât și prin semnale sosite din duoden.

Cercetările experimentale și clinice au evidențiat prezența mai multor tipuri de receptori în mucoasa gastro-duodenală, specializați în perceperea stimulilor fizici și chimici și a căror excitare determină apariția de impulsuri aferente pe căile parasimpatice și simpatice. În raport cu efectele pe care le au asupra evacuării

gastrice, ei se împart în receptori cu efect accelerator, prezenți în mucoasa fundică și stimulați de distensia gastrică, și cu efect inhibitor, situați la nivel duodeno-jejunal.

Stimularea receptorilor inhibitori inițiază reflexul entero-gastric, cu rol depresor al activității pompei pilorice. Astfel, de fiecare dată când chimul gastric ajunge în duoden, distensia acestuia declanșează inhibarea peristaltismului antral, limitând evacuarea (reflex protector).

Impulsurile nervoase inhibitoare transmise din duoden înapoi spre stomac, în special în timpul evacuării gastrice, par a juca rolul cel mai important în determinarea ratei de activitate a antrului piloric și a ratei evacuării (fig. 9.22).

S-au descris mai multe tipuri de receptori inhibitori: mecanoreceptori, chemoreceptori pH-sensibili, chemoreceptori proteo- și lipidossensibili, osmoreceptori. Căile arcului reflex sunt formate de fibrele aferente și eferente vagale subordonate centrului gastrosecretor bulbar, dar unele impulsuri pot fi transmise direct pe calea plexurilor mienterice intraparietale.

Reflexul entero-gastric inhibitor apare ca un mecanism de protecție a intestinului față de supraîncărcare, în cazul unei evacuări prea rapide a conținutului gastric, și dispare după secționarea nervilor vagi, nu însă a simpaticului (splanhnicilor).

El mai poate fi declanșat și de aciditatea excesivă a chimului acid, când pH-ul chimului care pătrunde în duoden scade sub 3,5-4,0, sistând evacuarea în continuare a conținutului acid în duoden, până ce chimul odată ajuns în duoden va fi neutralizat.

Soluțiile hiper- și hipotonice pot cauza un reflex entero-gastric, prevenind curgerea prea accelerată a celor două tipuri de lichide în intestin și totodată eventualele schimbări rapide în balanța electrolitică a organismului, prin absorbția conținutului intestinal.

Reflexul entero-gastric mai poate fi inițiat și de substanțe iritante pătrunse în duoden, ca și de unii produși ai metabolismelor proteice și lipidice.

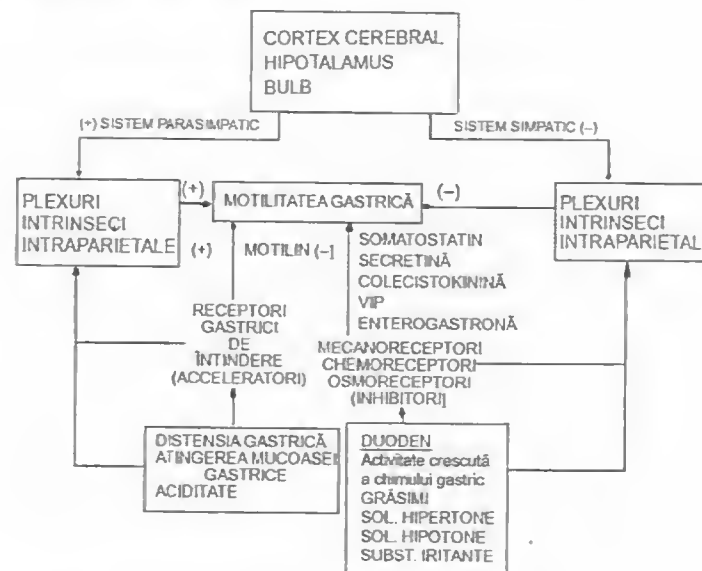


Fig. 9.22. Mecanismul neuro-umoral al evacuării gastrice.

Răspunsul inhibitor asupra peristaltismului gastric, apărut după o alimentație bogată în lipide sau în cazul tranzitării duodenului de către un chim gastric cu aciditate crescută, nu este abolit complet după vagotomie. Aceasta dovedește implicarea importantă a plexurilor nervoase intramurale în acest mecanism, cuplat, după cum arată datele clinico-experimentale, și cu rolul său în stimularea eliberării hormonului enterogastronă.

Alte reflexe inhibitoare gastrice sunt: reflexul ileo-gastric (evacuare gastrică încetinită în condițiile unui ileon umplut), reflexul ano-gastric (evacuare gastrică lentă datorită destinderii mecanice a anusului), precum și reflexe cu punct de plecare în nociceptorii viscero-somatici.

Mediația chimică a transmisiei nervoase în musculatura gastrică. La nivelul terminațiilor nervoase din peretele muscular gastric, ca de altfel și în acela al intestinului, acționează o serie de neurotransmițători, și anume: acetilcolina, noradrenalina, serotonina, histamina, substanța P. Aceste substanțe pot acționa în același timp și pe calea circulației generale.

Acetilcolina, mediator primar parasimpatic, își exercită efectele excitatoare direct pe celulele musculare netede, acționând predominant asupra receptorilor muscarinici.

Se discută și un rol miorelaxant în anumite zone ale tractului gastro-intestinal, dar dovezile nu sunt convingătoare.

Noradrenalina are efecte predominant inhibitoare pe răspunsul electric și contractil al celulelor mușchiului neted din pătura musculară externă, dar stimulează contracția muscularis mucosae. Efectul primar inhibitor este exercitat la nivelul plexurilor intrinseci, prin intermediul alfa-receptorilor, sau direct pe fibra musculară netedă, via beta-receptori.

Serotonina, histamina și substanța P, prezente în tubul digestiv de la stomac la colon, candidează azi la grupa neurotransmițătorilor clasici.

Serotonina a fost izolată în celulele enterocromafine din mucoasa intestinală și în neuronii din plexurile intramurale. Acționează direct pe diferiți receptori ai fibrei netede sau prin mijlocirea neuronilor colinergici sau plexurilor intramurale crescând eliberarea de acetilcolină, în ambele cazuri stimulând îndeosebi răspunsul contractil peristaltic, legat de creșterea presiunii intramurale.

Histamina, prezentă la nivelul plexurilor intrinseci, favorizează eliberarea acetilcolinei de către neuronii colinergici, acțiunea directă pe fibra musculară apărând numai la concentrații mari.

Substanța P, prezentă în tractul gastro-intestinal și în unele zone ale sistemului nervos central, a fost admisă ca neurotransmițător digestiv. Ea determină contracția mușchiului neted și stimulează reflexul peristaltic.

Alte substanțe ce sunt eliberate la nivelul terminațiilor nervoase și pot interveni în reglarea motilității gastro-intestinale sunt: ATP, enkefalinele, vasopresina, oxitocina, peptidul vasoactiv intestinal (VIP) și somatostatina.

Influențe nervoase centrale. Activitățile nervos-centrale ce au o componentă emoțională (durere, teamă, agresivitate) se reflectă asupra activității tractului digestiv, influențând motilitatea și secreția gastrică.

Stimularea electrică a unor regiuni ale SNC, mai ales ale sistemului limbic, influențează motilitatea gastrică. Astfel, la om, excitarea ariei din jurul insulei și a scizurii Sylvius poate declanșa fie puternice contracții gastrice, fie inhibarea acestora. De asemenea, stimularea regiunii tuberului la pisici neanesteziate prin electrozi implantați determină o creștere a presiunii intragastrice ce poate fi abolită prin vagotomie, în timp ce stimularea hipotalamusului posterior este urmată de o diminuare a presiunii intragastrice și oprirea peristaltismului.

Reglarea endocrină a motilității gastrice. Unii hormoni gastro-intestinali eliberați de sistemul endocrin difuz prezintă importante influențe reglatoare asupra motilității gastrice.

Gastrina, eliberată prin mecanisme colinergice de către antrul piloric ca răspuns la destindere și compoziția chimică a chimului, produce modificări ale motilității independent de efectul secretor. Ea determină creșterea activității electrice a fibrelor musculare gastrice, stimularea contracțiilor pe stomacul gol și scăderea tonusului regiunii fundice cu întârzierea evacuării gastrice.

Colecistokinina, secretina și somatostatina diminuează motilitatea antrală, contracția pilorului și întârzie evacuarea. VIP și glucagonul determină, de asemenea, temporizarea evacuării gastrice, în schimb motilitatea crește frecvența potențialelor de acțiune gastrice și stimulează activitatea de evacuare a stomacului.

9.2.2.6. Explorarea motilității gastrice

Activitatea motorie a stomacului se poate investiga prin metodele: viscerografică, radiologică și radiocinematografică.

Metoda viscerografică constă în înscrierea contracțiilor gastrice prin folosirea unei sonde subțiri de tip Einhorn, prevăzută cu un balonaș gol, ce este introdus în stomac prin înghițire. Destinderea balonului prin introducerea de aer sau apă declanșează motilitatea gastrică. Variațiile de presiune determinate de mișcările stomacului vor fi transmise, printr-un sistem pneumatic închis sau prin traductori de presiune, unei penițe înscriitoare, înregistrându-se gastrograma.

Metoda radioscopică se practică pe nemâncate, utilizând o substanță de contrast opacă la razele X și vizualizând la început stomacul gol și apoi ingestia fracționată a substanței opace.

Metoda radiocinematografică dă posibilitatea studierii conturului stomacului în dinamică, datorită înregistrării succesive și rapide a mișcărilor peristaltice ale stomacului.

9.2.3. DIGESTIA INTESTINALĂ

Ultima etapă a digestiei este cea intestinală, în cursul căreia se continuă scindarea enzimatică a substanțelor alimentare, începută în cavitatea bucală și stomac.

În intestinul subțire se desfășoară în același timp și importante fenomene de absorbție, ce au ca rezultat trecerea în sistemele circulatorii sanguin și limfatic a alimentelor sub formă de nutrimente simple: aminoacizi, monozaharide și acizi grași.

Se admite că segmentul superior al intestinului subțire deține predominant un rol digestiv și moderat absorbtiv, în timp ce segmentul inferior are în special funcție de absorbție, participând mai puțin la procesul de digestie.

Digestia componentelor chimului gastric are loc în duodenul inferior și jeuno-ileon, prin acțiunea asupra acestuia a produșilor de secreție pancreatică, biliară și intestinală propriu-zisă, secreții ce se găsesc amestecate la nivelul intestinului.

La nivelul primei porțiuni a intestinului se varsă sucul pancreatic și bila.

9.2.3.1. Secreția pancreatică

Pancreasul este o glandă anexă a tractului gastro-intestinal, cu funcții exocrină și endocrină.

Structura pancreasului exocrin este asemănătoare celei a glandelor salivare, fiind constituit din acini secretori și ducte intralobulare ce se varsă în marile canale excretore – Wirsung și Santorini (fig. 9.23).

Celulele acinoase se disting prin prezența abundentă a granulelor de zimogen, transportate prin exocitoză în ductele pancreatice, și a unui aparat Golgi cu rol esențial în formarea acestora. Celulele epiteliale ale canalelor excretore prezintă activități enzimactice marcante cu rol în secreția hidro-bicarbonată.

Canalul Wirsung străbate transversal pancreasul de la coadă la cap și se varsă în porțiunea a doua a duodenului, cel mai frecvent printr-un orificiu comun cu canalul coledoc la nivelul ampulei Vater, prevăzută cu sfincterul Oddi (fig. 9.24).

Sucul pancreatic. Produs de secreție al pancreasului exocrin, sucul pancreatic se eliberează în cantitate de 1 000–1 500 ml în 24 de ore. El se prezintă ca un lichid clar, vâscos, cu o densitate variind între 1 008–1 012 și cu un pH de 7–9, direct proporțional cu rata eliberării din acini.

În compoziția sucului pancreatic intră substanțe anorganice și organice.

Substanțele anorganice sunt reprezentate prin cationi de Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} și anioni: HCO_3^- , Cl^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} . Cantitatea de anion bicarbonic crește, pe măsura creșterii debitului secretor al pancreasului. Rolul său este unul din cele mai importante, în combinație cu Na^+ dând naștere bicarbonatului de sodiu ce asigură alcalinitatea puternică a sucului pancreatic ($\text{pH} = 8,0\text{--}8,5$), cu acțiune de neutralizare a sucului gastric la sosirea acestuia în duoden.

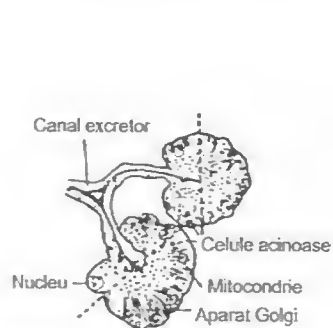


Fig. 9.23. Structura acinilor pancreatici

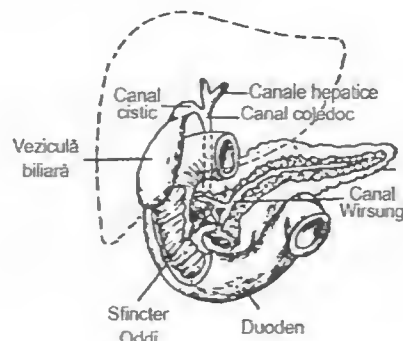


Fig. 9.24. Reprezentarea schematică a topografiei pancreasului, veziculei biliare și căilor biliare extrahepatice.

Dintre substanțele organice, cele mai importante sunt enzimele. Acțiunea acestora se exercită asupra celor trei principii alimentare: proteine, lipide, glucide.

Enzimele proteolitice. Enzimele proteolitice pancreatice hidrolizează proteinele până la stadiul terminal de oligopeptide. Aceste enzime sunt: tripsina, chimotripsina, carboxipeptidaza și ribonucleaza.

Tripsina: lichidul pancreatic pur este lipsit de acțiune proteolitică. Celulele glandulare pancreatice elaborează un zimogen precursor – tripsinogenul inactiv. La un pH de 7–8, acesta se transformă spontan în tripsina activă, printr-o reacție autocatalitică favorizată de Ca^{2+} . În intestin, această cataliză este realizată de o proteinază, enterokinaza, eliberată de mucoasa duodenală. Aceasta, având un conținut ridicat în polizaharide, nu este descompusă de enzimele intestinale înainte de a-și îndeplini rolul activator. Sub acțiunea enterokinazei, tripsinogenul se degradează în tripsină, pierzând din molecula sa șase aminoacizi.

Procesul se desfășoară exploziv, încât sunt suficiente numai urme de activator pentru a declanșa reacția, care continuă apoi nelimitat, indiferent de cantitatea de suc inactiv adăugată, întrucât tripsina odată formată transformă apoi catalitic propriul său precursor.

Tripsina, obținută în stare pură de Northrop (1934), este o endopeptidază ce scindează atât moleculele proteice mari, cât și peptidele simple. Acționează în mod specific rupând legăturile peptidice la nivelul radicalului carboxilic al celor doi acizi aminați bazici: lizina și arginina.

Această acțiune câștigă în eficacitate dacă proteinele au fost în prealabil supuse acțiunii pepsinei. Tripsina este activă și asupra nucleoproteinelor până la scindarea acestora în acizi nucleici, stadiu de la care acțiunea este preluată și dusă mai departe de enzimele sucului intestinal propriu-zis. Acționează în mediu alcalin, la un pH cuprins între 7 și 9, în funcție de gradul de ionizare a moleculei atacate. Sărurile de clor sunt ușor activatoare, posibil datorită faptului că favorizează dispersia micelilor coloidale și creșterea capacității lor de amestec cu enzima.

Chimotripsina este o endopeptidază care hidrolizează legăturile peptidice de la nivelul grupărilor carboxilice ale tirozinei, fenilalaninei, triptofanului, metioninei sau leucinei, la un pH optim de 8. Spre deosebire de tripsină, care coagulează sângele, chimotripsina prezintă proprietatea de a coagula laptele. Precursorul inactiv elaborat de celulele glandulare pancreatice este chimotripsinogenul, activat de către tripsină prin ruperea succesivă a mai multor legături peptidice.

Chimotripsina prezintă o acțiune de digerare mai rapidă asupra cazenei decât tripsina, iar un amestec al acestor două enzime continuă procesul de digestie, chiar mai departe decât fiecare enzimă separat, sugerând că sediul lor de acțiune este diferit.

Carboxipeptidaza este o exopeptidază pancreatică care scurtează polipeptidele cu un aminoacid. Precursorul inactiv elaborat de celulele glandulare pancreatice este precarboxipeptidaza, activată la rândul ei de tripsină în prezența zincului, drept cofactor.

Colagenaza este elaborată inițial de către pancreas sub formă inactivă, care, sub acțiunea tripsinei, se transformă în produs activ. Colagenaza scindează legăturile peptidice ale collagenului la nivelul aminoacizilor: prolină, hidroxiprolină și glicină.

Elastaza este produsă sub formă inactivă de proelastază de către acinii glandulari pancreatici și apoi activată de către tripsină și enterokinază în duoden. Această enzimă hidrolizează în special legăturile peptidice ale aminoacizilor: alanină, serină, glicină.

Ribonucleazele sunt esteraze ce acționează hidrolitic asupra acizilor ribonucleic și dezoxiribonucleic, desfășurând legăturile ester-fosfat, rezultând oligonucleotide.

Alte enzime proteolitice din suc pancreatic sunt: protaminaza și leucin aminopeptidaza, care scindează protamina și, respectiv, eliberează leucina din lanțul polipeptidic.

Pancreasul este protejat de autodigestie prin faptul că secretă proteazele sub formă de precursori inactivi, care devin activi numai în intestin. Pe de altă parte, țesutul glandular pancreatic are proprietatea de a distruge enzimele proprii sau a le neutraliza printr-o antienzimă, și anume antitripsina (inhibitorul tripsinei). Această substanță este depozitată în citoplasma celulelor glandulare în jurul granulelor de enzime și previne activarea exagerată a tripsinei, atât în celulele secretoare, cât și în acinii și ductele pancreatice. Deoarece tripsina activează și alte enzime proteolitice, inhibitorul tripsinei poate preveni, de asemenea, și activarea acestora.

Atunci când pancreasul este lezat grav sau canaliculele pancreatice sunt blocate, se acumulează o cantitate mare de suc pancreatic; inhibitorul tripsinei fiind depășit și secreția pancreatică rapid activată, aceasta poate digera în câteva ore întregul pancreas (pancreatita acută, adesea letală).

Enzimele glicolitice. **Amilaza pancreatică** este analogă ca acțiune celei salivare. Este elaborată în celulele acinoase la nivelul granulelor zimogene și secretată sub formă activă. Are un grad mult mai înalt de activitate decât ptialina, putând să digere în 30 de minute cantități de amidon de 20 000 de ori mai mari decât greutatea sa. Acționează la un pH optim de 6,5–7,2, prezența ionului de clor fiind necesară la activarea enzimei.

Enzimele lipolitice. **Lipaza pancreatică** este cea mai activă estereză din tubul digestiv, care separă prin hidroliză acizii grași de glicerol, la un pH variabil între 7–8, în prezența ionilor de Ca^{2+} și Mg^{2+} , ca activatori. Viteza de hidroliză a lipazei, dependentă de natura acizilor grași din compoziția lipidelor atacate, este intensă pentru acizii grași cu patru atomi de carbon și diminuată prin alungirea lanțului. Rezultă, astfel, că unii acizi grași continuă să rămână legați sub formă de mono- și digliceride sau chiar sub formă de trigliceride neatacate.

Sărurile biliare, prin acțiunea de emulsionare a grăsimilor, măresc suprafața de contact dintre substrat și enzimă, favorizând indirect activarea lipazei. Dacă lipaza pancreatică lipsește, grăsimile trec nedigerate în fecale, apărând steatoreea.

Cholesterol enteraza (colesterolaza) acționează scindând colesterolul alimentar esterificat în colesterol liber și acid gras (în prezența sărurilor biliare), ca și asupra monogliceridelor conținute în miceli.

Lecitinaza descompune fosfoaminolipidele în acizi grași și glicerofosfat de colină, hidrolizată uneori, la rândul ei, printr-o fosfatază.

Mecanismul secreției pancreatice. Sinteza și secreția enzimelor pancreatice are loc în două etape, și anume:

a) enzimele sunt sintetizate prin incorporarea acizilor aminați în proteinele enzimatice: procesul are loc la nivelul reticulului endoplasmatic rugos din celulele acinoase, de unde sunt transportate intracelular până la aparatul Golgi, unde vor fi transformate în vacuole prin învelire cu o membrană. Vacuolele se unesc apoi prin unirea membranelor și formează granulele zimogene;

b) granulele zimogene astfel formate vor migra la polul apical al celulei, unde vor fuziona cu membrana celulară și vor fi descărcate prin exocitoză în lumenul ductelor acinare. Stimularea puternică și continuă epuizează conținutul celular de granule de zimogen și acestea se refac în cursul repausului. În același timp, când conținutul în granule al celulei este eliminat integral în timpul secreției prelungite, au loc încă o simnează rapidă și o secreție aparent fără separarea de enzime în granule.

Când celulele pancreatice stimulate secretă enzime, viteza metabolismului fosfolipidelor este foarte crescută. Compusul activ este fosfoinozitolidul, ce conține pe de o parte inozitol și acid fosforic, în raport de 1/1, și, pe de altă parte, glicerol și acizi grași, în raport de 1/2.

În prezența fosfatului radioactiv ($H^{32}PO_4$), sumularea secreției produce o creștere de 10 ori a vitezei de incorporare a ^{32}P în fosfatidilinozitol; în același timp, viteza de incorporare a inozitolului este crescută de cinci ori. Se pare că, dimpotrivă, creșterea derivaților metabolismului fosfatidilic – etanolamina, colina și serina – este mai puțin importantă.

Aceste fenomene sunt asociate cu secreția și nu cu sinteza, căci ele apar în timpul expulziei enzimelor și chiar în condițiile în care nu are loc o nouă sinteză, sau când pancreasul este stimulată de secretină și formează compusul apos.

Reacțiile au loc aparent în membrana reticulului endoplasmatic, care separă locul sintezei de proteine de spațiile intervacuolare, unde proteinele sunt puse în rezervă și concentrate. Aceste reacții fac probabil parte din procesele ce au loc la trecerea membranei de către proteinele ce sunt transportate plecând de la ribozomi. Ciclul metabolic al fosfolipidelor (mai ales cel al fosfoinozitolidului) este foarte accelerat în pancreas și în alte țesuturi în timpul transportului particulelor ce traversează reticulul endoplasmatic. Fosfolipidele pot reprezenta, astfel, un constituent major al membranelor în care particulele sunt învelite (chilomicronii eliberați în chim sunt înveliți de un strat de fosfolipide). Chilomicronii formează o emulsie foarte stabilă, dar emulsia poate fi rapid clarificată dacă învelișul fosfolipidic este mai întâi atacat de lecitinază.

Secreția hidroelectrolitică a pancreasului este produsă de către celulele epiteliale ce mărginesc canaliculele scurte. Apa se excretă pasiv, întesitatea eliminării fiind dependentă de trecerea activă a unor ioni, astfel încât suctul primar este hipertonic față de plasmă, dar, pe parcurs, până la ampula Vater, devine izoton.

Există două pompe active, cea de Na^+ și cea de HCO_3^- . Prima pompă menține concentrația Na^+ în suctul pancreatic în jur de 150 mEq/l, chiar în condițiile unor mari variații ale cantității de suct excretat. Pompa de bicarbonat realizează transportul activ al anionului HCO_3^- în canalele de excreție ale glandei, asigurând concentrații de 3–4 ori mai mari în caoliculi decât în plasmă. Anionul HCO_3^- provine din CO_2 local, ca produs final metabolic, ca și din plasmă. În prezența anhidrazei carbonice are loc hidratarea CO_2 , formându-se H_2CO_3 , ce disociază rapid în HCO_3^- și H^+ , ultimul ion fiind reabsorbit în plasmă la schimb cu ionul de Na^+ , care este pompat activ în ductul pancreatic, unde va forma cu anionul HCO_3^- bicarbonatul.

9.2.3.2. Reglarea secreției pancreatice

Ca și suctul gastric, secreția pancreatică este supusă controlului nervos și umoral. În cursul reglării se disting trei faze: cefalică, gastrică și intestinală.

Faza cefalică. În cursul fazei cefalice, reglarea se face predominant pe cale nervoasă. În această fază, secreția este declanșată de excitanți condiționați și necondiționați, care declanșează secreția salivară și gastrică. La animalele cărora li se administrează un prânz fictiv are loc elaborarea unui suct pancreatic bogat în enzime, dar redus ca volum, secreție numită ebolică.

Controlul nervos este realizat de către nervul vag, care conține fibre destinate pancreasului și a cărui stimulare determină o secreție foarte activă din punct de vedere diastazic. Apariția acestui suct ebolic se produce prin mecanism coliergic, întrucât ezerina (parasimpatomimetic) întărește acest efect, iar atropina (parasimpatolitic) îl suprimă. Simpatolitic (nervul splanhnic) este inhibitor (fig. 9.25). Stimulul ce declanșează secreția este deglutiția. Vagotomia determină dispariția secreției.

Se apreciază, în ultimul timp, că reglarea nervoasă din cadrul fazei cefalice are și o componentă umorală, reprezentată de gastrina stimulată pe cale vagală. Gastrina ar stimula, la rândul ei, pancreasul exocrin, fie pe cale directă, fie prin activarea secreției acide a stomacului, care, sosită în duodeo, ar intensifica secreția de bicarbonat de către celulele canaliculare.

Faza gastrică. Este declanșată de prezența alimentelor în stomac și este reglată nervos și umoral.

Distensia peretelui gastric declanșează prin reflex vago-vagal secreția de suct pancreatic bogat în enzime, continuată și intensificată apoi puternic de către stimularea eliberării de gastrină. Participarea gastrinei este demonstrată de către stimularea secreției pancreatice după distensia antrală în condițiile vagotomiei.



Fig. 9.25. Reglarea secreției pancreatice.

Este probabil ca un anumit rol stimulator să fie jucat și de plexurile oeruoase intramurale.

Faza intestinală. Odată ajuns în duodeo, chimul gastric acid determină prin mecanism dublu, neuro-umoral, stimularea secreției de suct pancreatic.

În această fază se realizează aproximativ 80% din răspunsul secretor pancreatic, adecvat gradului de aciditate și constituenților chimului gastric.

Rolul principal este deținut de controlul hormonal.

Acidul clorhidric conținut în chim determină eliberarea din mucoasa duodenală a unei substanțe, numită *secretină*, care, ajunsă în sânge, excită celulele glandulare pancreatice și stimulează secreția biliară și intestinală. Administrată parenteral, este distrusă de sucurile digestive.

Structura secretinei este actualmente cunoscută grație lucrărilor lui Jordes și Mutt (1963–1966), care au sintetizat-o. Secretina este un polipeptid liniar, format din 27 de aminoacizi cu următoarea secvență:

His-Ser-Asp-Gly-Thr-Phe-Thr-Ser-Glu-Leu-Ser-Arg-Leu-Arg-Asp-Ser-Ala-Arg-Leu-Glu-Arg-Leu-Leu-Gly-Leu-Val-NH₂(27).

Foarte diferită de gastrină, secretina prezintă analogie de structură cu glucagonul (14 aminoacizi identici).

Nu s-a putut localiza deocamdată o porțiune activă pe molecula de secretină, a cărei integritate este necesară activității fiziologice. Ea determină o secreție bogată în apă și săruri anorganice (bicarbonat), dar săracă în enzime (secreția hidrolitică). Mucoasa duodenală eliberează secretină atunci când pH-ul scade sub 4 și stimulează prin intermediul acesteia producția de suct pancreatic bogat în bicarbonat, care tamponază acidul clorhidric din stomac; eliberarea de secretină reprezintă astfel un mecanism de protecție a mucoasei intestinale față de acțiunea peptică a suctului gastric.

În același timp, pe cale directă, secretina ajunsă pe cale sanguină la nivelul stomacului stimulează secreția de pepsină și inhibă formarea de HCl și motilitatea gastrică.

Efectul inhibitor al secretinei asupra acidității gastrice predomină asupra celui eliberator de pepsină și este probabil că se realizează prin suprimarea secreției de gastrină.

Un al doilea hormon izolat din mucoasa duodenală, de către Harper și Raper (1943), este numit *pancreozimină*. Aceasta s-a dovedit a fi identică cu colecistikinina, pusă în evidență cu mult înainte de Ivy (1928), ca factor hormonal cu punct de plecare duodenal, care controlează motricitatea și evacuarea veziculei biliare.

Pancreozimin-colecistokinina (CCK-PZ) nu este, deci, decât unul și același hormon, cu efecte principale asupra volumului secretor (secreția ecobolică).

Eliberarea de CCK-PZ este stimulată de către aminacizi, albumoze, peptone și acizi grași, în vederea eliberării de fermenți pancreatici necesari desăvârșirii digestiei proteice intestinale.

Producerea acestui hormon este mai puțin dependentă de pH. Ambii hormoni, secretina și CCK-PZ, se potentează reciproc, favorizând în felul acesta atât secreția hidrolitică, cât și cea ecobolică.

9.2.3.3. Explorarea secreției pancreatice

Explorarea secreției exocrine a pancreasului cuprinde:

a) recoltarea sucului pancreatic, măsurarea volumului și dozarea enzimelor.

Recoltarea se face cu ajutorul sondelor duble (gastrică și duodenală), prevăzute cu balonașe prin care se însuflă aer, ce împiedică scurgerea de suc gastric ori refluxul jejunal, sau prin sonde Einhorn.

Se produce evacuarea bilei coledoco-veziculare cu SO₂Mg 33%, introdus prin sondă, și, după epuizarea secreției biliare, se administrează succesiv hormonii pancreozimină și secretină;

b) dozarea enzimelor pancreatice în sânge și urină (amilaza, tripsina etc.);

c) explorarea cu ajutorul substanțelor marcate radiațional;

d) examinarea materiilor fecale (examenul microscopic și coprograma), care poate pune în evidență în cazul insuficienței pancreatice picături de grăsime, granule de amidon neatacate și fragmente de fibre musculare nedigerate.

9.2.3.4. Secreția și motilitatea biliară

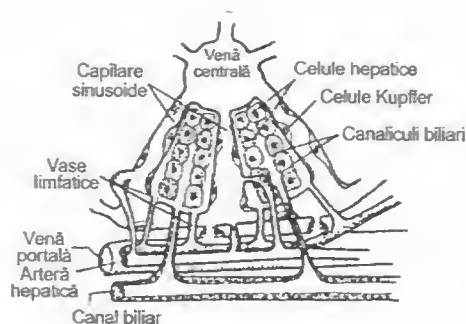
Secreția biliară este elaborată în celulele ficatului și vărsată în canalele biliare, de unde se drenează în duoden.

Ficatul reprezintă o importantă glandă anexă a tubului digestiv, cu structură și funcții extrem de complexe.

Unitatea structurală de bază a ficatului este lobulul hepatic. El are formă piramidală, cu lungimea de câțiva milimetri și diametrul de 0,8–2 mm. Ficatul uman conține între 50 000–100 000 de lobuli. Lobulul hepatic este constituit din celule hepatice (hepatocite), capilare și canaliculi biliari (fig. 9.26).

Ficatul deține importante roluri în economia generală a organismului, fiind cea mai complexă glandă din organism.

Fig. 9.26. Structura lobulului hepatic.



Prezentate în mod succint, funcțiile hepatice sunt următoarele: formarea bilei; depozitarea de glucide; formarea cripilor celnici, precum și alte funcții implicate în controlul metabolismului glucidic; reducerea și conjugarea catecnaminelor și hormonilor gonadali; sinteza de proteine; inactivarea hormonilor polipeptidici; detoxifierea organismului (toxine, substanțe medicamentoase etc.); formarea ureei; implicarea în controlul metabolismului lipidelor; contribuție la depozitarea sângelui și la transferul sângelui port în marea circulație; contribuție la termoreglare; funcție hematopoietică (în perioada embrionară).

Formarea și compoziția secreției biliare. Bila este un produs de secreție și excreție hepatică, care se acumulează în afara perioadelor de digestie în vezicula biliară, unde se concentrează și de unde se elimină intermitent prin coledoc în a doua porțiune a duodenului. La nm, bila este secretată continuu de către polul biliar al celulei hepatice.

Cantitatea de bilă secretată la om în 24 de ore este de 700–1 200 ml; influențată de natura alimentelor, ea rămâne sensibil constantă la un regim alimentar determinat.

Elaborarea bilei are loc printr-o serie de procese succesive, ce cuprind captarea sau sinteza de către hepatocit a substanțelor ce intră în compoziția bilei, transportul prin celula hepatică al acestor substanțe și excreția lor prin polul biliar al hepatocitului în canaliculii biliari.

Mecanismele de secreție a bilei (cnleza) sunt complexe și încă insuficient clarificate. Ele par să se realizeze inițial prin filtrare, proporțională cu debitul sanguin hepatic (glucoză, apă, săruri, K⁺, Cl⁻), urmată de secreție activă cu consum de energie și sediu predominant hepatocitar (acizii biliari, săruri biliare) și secreție-reabsorbție (apă, Na⁺, Cl⁻) în ductele și canalele interlobulare.

Bila este un lichid a cărui culoare și a cărui compoziție apar diferite în cazul bilei hepatice și al celei veziculare. Astfel, bila hepatică este galben-aurie, clară, aproape izotonică, cu un pH de 8–8,6. Bila veziculară este verde-brună, tulbură din cauza resturilor epiteliale și a sărurilor de calciu și filantă din cauza mucinei; pH-ul ei este cuprins între 7 și 7,6. În vezicula biliară are loc o puternică resorbție a apei, astfel că bila hepatică se concentrează de 8–10 ori. Constituții principali ai bilei sunt săruri biliare, pigmenti biliari, colesteryl, lecitină, acizi grași, mucină și substanțe anorganice: clnuri de Na, K, Ca, bicarbonați și fnsfați. Bila nu este un suc digestiv propriu-zis și nu conține enzime, cu excepția fosfatazei alcaline, ce se excretă prin bilă.

Sărurile biliare sunt glicocolatul și taurocolatul de Na și K. Sinteza lor se efectuează în ficat, plecând de la acizii: cnlic, dezoxicolic, litocolic și chenodezoxicnic, proveniți atât din cnlesternul exogen (alimentar), cât și din cel endogen (rezultat din celulele hepatice). Acizii amintiți, îndeosebi acidul cnlic, se combină cu dnl acizi aminați, glicocnlul sau taurina, formându-se acizii glicocolic sau taurocolic.

Sărurile biliare rezultă din combinarea acizilor biliari cu Na⁺ sau K⁺.

Sărurile biliare au o acțiune de tip detergent, scăzând tensiunea superficială a particulelor mari de grăsime și favorizând fracționarea în particule fine, în vederea emulsinării lor. Sărurile biliare intervin, de asemenea, în activarea lipazelor, în transportul acizilor grași (rezultați prin lipoliză) din lumenul intestinal până în imediata apropiere a peretelui intestinal, cu ajutorul micelurilor (adevărate „platforme” de transport), precum și în absorbția acizilor grași și monogliceridelor din tractul intestinal, favorizând-o prin schimbarea sarcinii electrice a acestora.

Cea mai mare parte (9/10) din sărurile biliare sunt resorbite prin mucoasa intestinală împreună cu grăsimile, însă după trecerea prin mucoasă se separă de grăsimi și ajung în sânge. Ajunse în ficat pe cale sanguină, sunt reabsorbite de polul sanguin al celulei hepatice și secretate la polul biliar, realizând circuitul hepato-entero-hepatic al sărurilor biliare (fig. 9.27).

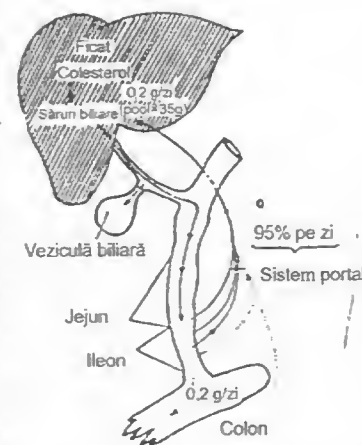


Fig. 9.27. Circuitul hepato-entero-hepatic al sărurilor biliare.

Controlul secreției de săruri biliare se face mai ales de către concentrația portală a acestora prin *feedback* negativ asupra sîntezei hepatice. Pe lângă colecistokinină și secretină, duodenul influențează secreția biliară și prin motilin (colecistokinetic) și gastrină. Simpaticul relaxează vezicula biliară, iar vagul o contractă și relaxează sfincterul Oddi; de asemenea, stimulează și secreția biliară.

Pigmenții biliari sunt reprezentați de bilirubină și biliverdină. Bilirubina provine din distrugerea globulelor roșii prin procesul de hemoliză, care are loc în țesutul reticulo-endotelial. Ficatul nu este sîngurul țesut unde se petrece această transformare, concepția biligeoiei exclusiv hepatice fiind abandonată. Excreția se face însă numai de către celula hepatică. Conversia hemoglobinei în bilirubinoză are loc în trei etape:

- desfacerea inelului tetrapirolic al hemoglobinei, cu formare de coeglobină de culoare verde la nivelul sistemului reticulo-endotelial (SRE);
- pierderea fierului de către coeglobinoză, cu formarea biliverdino-globinei;
- prin detașarea globinei din complexul biliverdino-globină se pune în libertate biliverdina, albastră-verzuie, care este redusă în bilirubină de culoare galben-roșie.

Bilirubina astfel formată este transportată de sînge spre ficat sub formă legată de albumine (fig. 9.28). Celula hepatică o detașează de proteine și o conjugă cu acidul glucuronic, dînd naștere la bilirubinoză hepatică. Procesul are loc în prezența glucuronil transferazei.

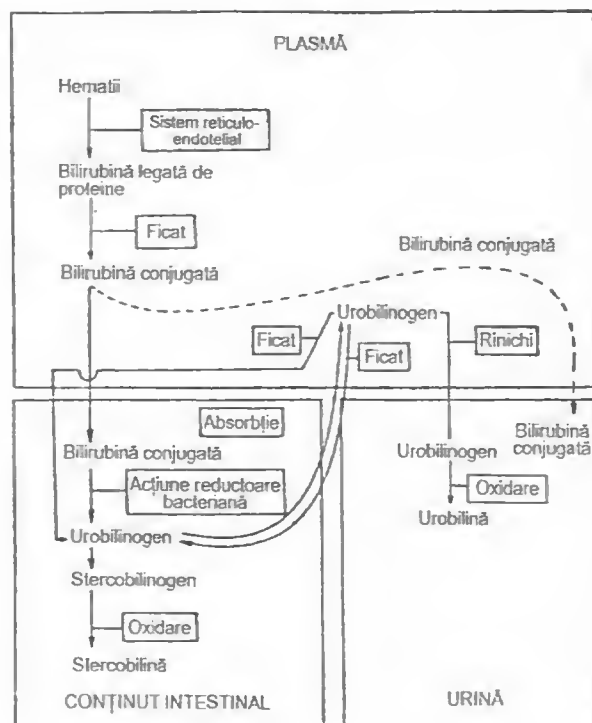


Fig. 9.28. Formarea și eliminarea pigmenților biliari.

Bilirubina eliminată în căile biliare se află în proporție de 76-80% sub formă glucuronocojugată. Vărsată în intestin, bilirubina este supusă acțiunii enzimelor reductoare bacteriene. Ea este astfel hidrogenată în etape succesive și dă naștere mezobilirubinei (bilirubină + 4 H) și apoi urobilino-genului (mezobilirubină + 4 H), care poate trece în stercobilinogen (urobilinogen + 4 H). Acesta, la rîndul lui oxidat, se transformă în stercobilină, ce se elimină prin materiile fecale dînd în parte colorația acestora.

Urobilino-genul format în intestin se resorbe parțial prin mucoasa intestinală și, ajuns la ficat, participă la formarea bilirubinei. O altă parte de urobilino-gen este distrusă la nivelul ficatului.

O mică cantitate din derivații de reducere ai bilirubinei resorbiți în sînge prin peretele intestinal scapă ciclului entero-hepatic și sunt excretați de rinichi (de exemplu, urobilino-genul) în proporție de 0,6 mg/24 de ore, sub formă de urobilină (urobilinogen oxidat). Această cantitate crește atunci cînd scade capacitatea ficatului de a distruge urobilino-geoul, de aceea exagerarea urobilinuriei este semn de insuficiență hepatică.

Dacă scurgerea bilei în intestin este împiedicată datorită unui obstacol (cel mai adesea, prezența de calculi în căile biliare sau compresii tumorale de vecinătate), bila secretată este redirecționată spre polul sanguin al hepatocitului în circulația sistemică și apare icterul (colorația galbenă a pielii și mucoaselor datorită pigmenților biliari). Însoțit de decolorarea materiilor fecale.

Atunci cînd are loc o distrugere masivă a hematiilor, ficatul nu va putea excreta întreaga cantitate de bilirubinoză, ceea ce va duce, de asemenea, la creșterea concentrației ei în sînge. Din cantitatea mare de bilirubinoză excretată de ficat prin căile biliare, se formează cantități excesive de stercobilinogen, ducînd la hiperpigmentarea materiilor fecale.

Este de reținut că pigmenții biliari suferă fără acțiune fiziologică. Organismul se debarasează de aceștia, ca de orice produs de deșeu, excepție făcînd doar fierul, care este recuperat de organism pentru a fi utilizat la sinteza hemoglobinei, proces ce se desfășoară continuu de la naștere și pînă la moarte.

Bilirubinemia fiziologică este în jur de 5 mg la litru de plasmă.

Cholesterolul din bilă se află în cea mai mare parte sub formă liberă, neesterificată. El provine atât din colesterolul alimentar (exogen), cât și prin sinteza hepatică (endogen).

Din cantitatea totală de colesterol eliminată prin secreția biliară, aproximativ 60% reprezintă colesterol ca atare, restul de 40% aflîndu-se în compoziția sărurilor biliare.

Odată ajuns în intestin, colesterolul este parțial recuperat în cadrul unui circuit entero-hepatic, în timp ce altă cantitate se elimină prin materiile fecale metabolizată în coprostanol.

Dacă raportul dintre colesterol și sărurile biliare crește față de valorile normale ($\frac{\text{colesterol}}{\text{săruri biliare}} = 0,03-0,05$), atunci colesterolul poate precipita și favoriza formarea calculilor biliari.

În bilă se mai găsesc fosfolipide (în special lecitină), acizi grași, mucină, substanțe minerale.

Bila se secretă continuu la om, deversarea în duoden făcîndu-se intermitent.

Excitarea capetelor periferice și centrale ale vagului, substanțele parasimpatomimetice (exemplu, pilocarpina, prostigmina) măresc secreția biliară. Dintre alimente, carnea și grăsimile au, de asemenea, o acțiune de mărire a secreției biliare (acțiune coleretică). Însăși sărurile biliare pot stimula puternic creșterea secreției de bilă (cu 300%).

Secreția biliară este astfel autoîntreținută de sărurile biliare, ceea ce explică continuitatea și oscilațiile spontane legate mai mult sau mai puțin de acizii biliari resorbiți din intestin. Stimularea simpaticei produce, din contră, inhibarea secreției de bilă.

Evacuarea bilei. Așa după cum s-a menționat anterior, secreția bilei are loc în mod permanent, iar evacuarea ei în intestin se face numai în fazele de digestie. În perioadele de repaus digestiv, cînd presiunea în canalele extrahepatice ajunge la 50-70 mmH₂O, bila trece prin canalul cistic în vezicula biliară, astfel că transportul bilei de la ficat în colecist se face pe bază exclusiv de forțe fizice presionale. Avînd în vedere că în repaus digestiv sfincterul Oddi este închis, bila nu poate ajunge în această perioadă în duoden. Pe de altă parte, volumul veziculei biliare fiind limitat la aproximativ 50 ml, iar secreția biliară avînd o rată de eliminare hepatică de 0,5 ml/min, bila este intens concentrată pînă la absorbția apei din acest rezervor, de 12-18 ori. Acumularea este posibilă datorită proprietății de plasticitate a mușchilor netezi ai veziculei biliare, pînă la cînd viscerele cavitare își pot modifica volumul prin relaxarea între anumite limite, fără modificări semnificative ale presiunii intracavitare.

În perioadele digestive, contracția veziculei biliare creează în veziculă o presiune de 250–300 mmH₂O, sfîcterul Oddi putînd rezista pînă la o presiune de 300 mmH₂O. Contracția veziculei se însoțește de relaxarea acestui sfîcter, procesul fiind sincronizat printr-un mecanism neurogen (plexurile intrinseci și inervația extrinsecă) sau miogen, colecistul și sfîcterul Oddi reprezentînd o unitate funcțională.

Eliminarea bilei în intestin este influențată și de contracția pereților duodenali.

Alimentele care stimulează puternic golirea veziculei biliare sunt gălbenușul de ou, smîntîna, untdelemnul; substanțele care determină evacuarea veziculei biliare prin contracția colecistului și relaxarea sfîcterului Oddi se numesc colagoge.

Rolurile bilei. Bila îndeplinește următoarele roluri: intervine indirect în digestia și absorbția grăsimilor prin emulsionarea lor, activarea lipazelor pancreatice, mărindu-le de 3–4 ori puterea lipolitică, și favorizarea absorbției acizilor grași și a monogliceridelor solubilizate. Favorizînd absorbția grăsimilor, bila asigură și absorbția vitaminelor liposolubile (A, D, E, K), a colesterolului și a unor metale ca fierul. Bila are și o acțiune antiputridă asupra florei și putrefacției din colon. De asemenea, ea împiedică coagularea mucusului intestinal, inhibînd o mucinază și favorizînd peristaltismul. Prezintă un rol și în neutralizarea în intestin a sucului gastric acid.

9.2.3.5. Reglarea secreției și motilității biliare

Reglarea secreției biliare. *Reglarea nervoasă.* În cazul secreției biliare, rolul sistemului nervos vegetativ este redus. Nu există dovezi ale existenței unor nervi secretori de bilă. Dacă inervația aferentă a ficatului crește ușor fluxul biliar și dacă excitarea pneumogastricului amplifică puțin secreția, iar excitarea splanhnicului o inhibă, acestea au loc ca o consecință a modificărilor de debit sanguin în organ. Există însă și opinia potrivit căreia bila este secretată în mod continuu sub influența stimulilor vagali, fie direct prin

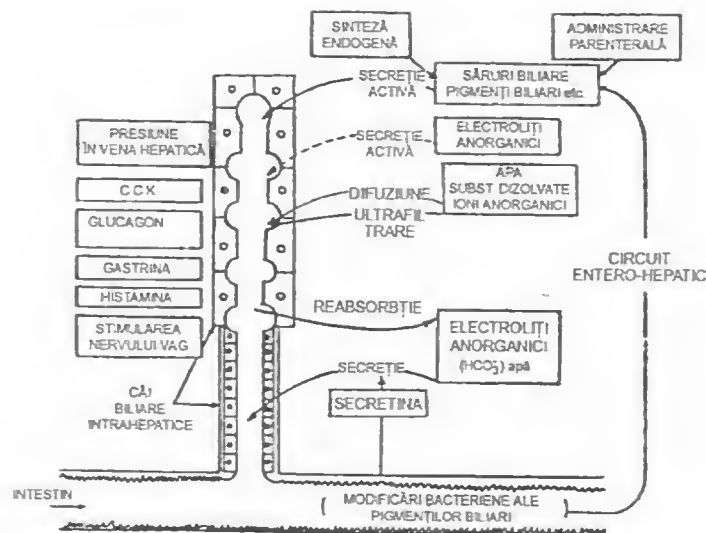


Fig. 9.29. Factorii care influențează fluxul biliar și compoziția bilei. Factorii din partea dreaptă a schemei acționează la nivelul canalelor și ductelor biliare, pentru acestea sărurile biliare avînd un puternic efect coleretic; dintre factorii din stînga, glucagonul, CCK și gastrina posedă, de asemenea, efecte coleretice, în timp ce influențele nervoase vagale nu sunt încă suficient de precizate

influența asupra celulei hepatice, fie prin intermediul gastrinei cu efecte stimulatorie asupra secreției biliare, ceea ce ar atesta un mecanism central vago-vagal de reglare. În același timp, stimularea simpaticului și adrenalina ar reduce producția biliară, o acțiune inhibitoare exercitînd și distensia colonului.

Reglarea umorală. Dacă în timpul repausului digestiv volumul secreției biliare variază între 5–10 ml/kg corp/24 de ore, în cursul digestiei el atinge 20–27 ml/kg corp/24 de ore. Un rol însemnat excito-secretor îl are însăși bila, prin sărurile biliare reabsorbite din intestin și care acționează printr-un mecanism de *feed-back* pozitiv.

Probabil, o parte importantă a intensificării postprandiale a secreției biliare se datorează creșterii absorbției acestor constituenți biliari.

În timpul digestiei, secreția biliară poate crește și prin mecanisme endocrine. Astfel, secretina, stimulată de prezența chimului acid în duoden, crește fluxul biliar (efect coleretic), în special în ceea ce privește conținutul de bicarbonat, clorură de Na și K. Gastrina, colecistokina, glucagonul și histamina exercită efecte coleretice, dar într-un grad mai redus decât secretina (fig. 9.29).

Reglarea evacuării bilei. Este efectuată pe cale nervoasă și umorală.

Controlul nervos, vago-simpatic, este de importanță secundară. Datele clasice admit că vagul are efecte stimulatorie asupra contracției veziculei biliare, relaxînd în același timp sfîcterul Oddi, în schimb, simpaticul are acțiuni inverse (fig. 9.30.)

Obținerea însă de efecte inconstante și variabile la stimularea vagului, ca și faptul că spasmul sfîcterului Oddi este suprimat de atropină și vagotomie sugerează că, în realitate, vagul și simpaticul conțin atât fibre motorii, cât și fibre inhibitoare, cu receptori diferiți. Răspunsul vezicular de un tip sau altul depinde de preponderența fibrelor excitatoare sau inhibitoare stimulate. La închiderea și deschiderea sfîcterului Oddi participă și un mecanism de origine miogenă, determinat de contracția pereților duodenali. Astfel, prezența alimentelor în duoden stimulează creșterea peristaltismului acestuia, unda peristaltică în deplasare atingînd și sfîcterul Oddi; oricum, unda de contracție este precedată de relaxare subiacentă și determină implicit în drumul ei relaxarea momentană a acestui sfîcter, încît, dacă există o presiune suficientă a bilei în coledoc, o cantitate mică poate pătrunde în acest mod în duoden. La coordonarea

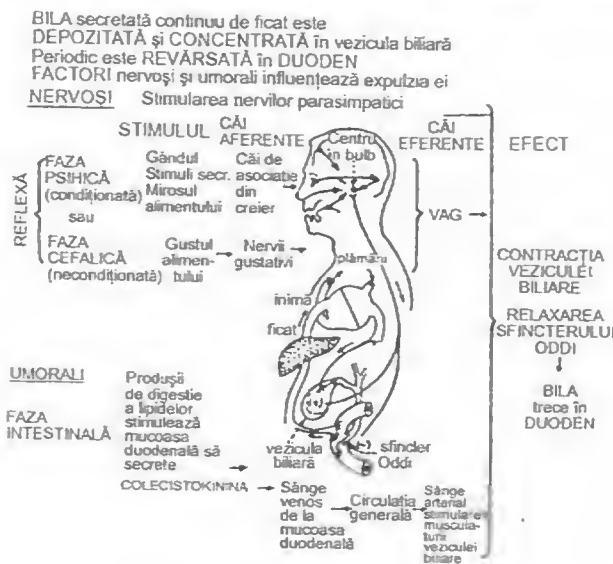


Fig. 9.30. Reglarea evacuării veziculei biliare.

nervoasă a evacuării se mai adaugă și participarea importantă a plexurilor nervoase intrinseci din peretele colecistului, ca și reglarea de natură endocrină. Cu toate că există încă lacune importante în ceea ce privește mecanismele exacte ale reglării motricității căilor biliare, ceea ce se detașează cu siguranță este acțiunea lor coordonată. De importanță deosebită în controlul evacuării bilei este reglarea endocrină, dovadă fiind faptul că denervarea colecistului nu împiedică deversarea bilei în duoden.

Hormonul cu acțiune selectivă este colecistokinina, eliberat de mucoasa duodenală. Acest hormon, identic de altfel cu pancreozimina (CCK-PZ), are și acțiune stimulatorie asupra secreției pancreatice, dar doza de CCK necesară pentru a produce contracția veziculei biliare este 7-8 ori mai mare decât cea necesară excitării secreției pancreatice (tabelul 9.V). Se admite, de asemenea, posibilitatea ca CCK să determine, sincron cu contracția veziculei biliare, relaxarea sfincterului Oddi.

TABELUL 9.V

Principalii factori ai sintezei și evacuării bilei			
Faza de digestie	Stimuli	Factori intermediari	Răspuns
Cefalică	Gustul și mirosul alimentelor; prezența alimentelor în cavitatea bucală și faringe	Impulsuri vagale	Creșterea evacuării bilei
Gastrică	Distensia gastrică	Impulsuri vagale Gastrina	Creșterea evacuării bilei
Intestinală	Prođuși de digestie a lipidelor în duoden Scăderea pH în duoden Absorbția acizilor biliari în ileonul distal	Colecistokinina Secretina Concentrația crescută a acizilor biliari în sângele portal	Creșterea evacuării bilei; creșterea secreției acizilor biliari Creșterea secreției electrolitilor și apei Stimularea secreției acizilor biliari; inhibarea sintezei hepatocitare de acizi biliari
Interdigestiv	Eliberarea scăzută a bilei în duoden	Concentrația scăzută a acizilor biliari în sângele portal	Stimularea sintezei de acizi biliari; inhibarea secreției de acizi biliari

Colecistokinina, stimulată la rândul ei de produșii de digestie lipidică din duoden, acționează direct asupra receptorilor specifici ai fibrelor musculare netede ale veziculei biliare. Acțiuni contractile mai prezintă gastrina și secretina, ultima potențând acțiunile CCK și crescând nu numai volumul de bilă secretată, ci și concentrația de pigmenți și săruri ale acestora (așa-numită bilă apoasă sau de secretină).

9.2.3.6. Explorarea secreției și motilității biliare

Secreția biliară se recoltează prin tubaj duodenal cu ajutorul sondei Einhorn ce se introduce până la aproximativ 65-70 cm. Stimularea mecanică a duodenului declanșează deschiderea sfincterului Oddi și scurgerea bilei. Tubajul duodenal oferă indicații privind permeabilitatea căilor biliare. Se poate utiliza tubajul simplu sau minnat. Ultimul dă indicații mai exacte privind urmărirea timpului de scurgere a bilei și a modificărilor ce intervin în scurgerea ei de la introducerea sondei în duoden și până la scoaterea ei (timpul coledocian, timpul Oddi închis, timpul de scurgere a bilei A hepato-coledociene: timpul vezicular – al bilei B vezicular, timpul hepatic – al bilei C hepatice). Se măsoară volumele fracționate de bilă și se face examenul macroscopic, microscopic și chimic al bilei.

Motricitatea veziculei biliare se poate inspecta radiologic după administrarea unei substanțe de contrast. Aceasta, eliminată prin bilă în vezicula biliară, suferă același proces de concentrare ca și ceilalți

constituenți ai bilei și colecistul devine opac la razele X, ceea ce oferă date privind mărimea, forma și poziția acesteia.

În continuare, stimularea motilității se poate face prin ingerarea de gălbenuș de ou. Aprecierea comparativă a dimensiunii veziculei de repaus și contractate se face pe filme radiologice seriate, în cadrul metodei ce poartă în ansamblu numele de colecistografie. Metoda radiomanometrică este o metodă sângerândă, în care, cu ajutorul unui manometru, se măsoară rezistența opusă de sfincterul Oddi la evacuarea substanței de contrast, introdusă în prealabil. Metoda dă indicații privind permeabilitatea căilor biliare extrahepatice, starea de tonus al sfincterelor și capacitatea de contracție a veziculei biliare.

Echotomografia veziculei și căilor biliare poate evidenția vezicule cu calculi ce produc ecouri dense.

9.2.3.7. Secreția intestinului subțire

Din punctul de vedere anatomic și funcțional, intestinul prezintă două segmente, intestinul subțire și intestinul gros.

Secrețiile, motilitatea, fenomenele de digestie și absorbție care au loc în aceste arii se particularizează pentru fiecare din segmentele amintite.

Intestinul subțire se întinde de la sfincterul piloric până la valva ileo-cecală și cuprinde duodenum, jejunul și ileonul. Lungimea intestinului subțire este de aproximativ 6-8 m în condiții de relaxare, cu un diametru ce variază descrescător în ordinea segmentelor amintite, de la 4 cm la 1,5 cm.

Din punct de vedere al structurii, intestinul subțire prezintă o serie de diferențieri anatomo-funcționale proprii în cadrul anatomiei funcționale a tubului digestiv. Astfel, între stratul muscular intern circular și cel extern longitudinal, există punți musculare ce realizează adevărate legături funcționale, asociate în același timp cu prezența unor puncte de fuziune membranară intercelulară, ceea ce conferă straturilor musculare caracter de sincițiu.

Mucoasa intestinului subțire are o suprafață activă importantă, aproximativ 250-300 m², asigurată îndeosebi de valvele conivente. Acestea sunt reprezentate de pliuri mucoase semicirculare, cu o densitate crescută în duodenul terminal și porțiunea incipientă a jejunu-ileonului.

Pe suprafața valvulelor conivente și între ele, se găsesc vilozitățile intestinale, prelungiri digitiforme ale mucoasei cu lungimea de 0,5-1 mm (fig. 9.31).

Prezența vilozităților crește de 25-30 de ori suprafața intestinală (până la 20 000 m²), fapt deosebit de important în asigurarea proceselor de digestie și absorbție intestinală. În axul central al vilozității se află rețelele: arterială, venoasă, limfatică și nervoasă.

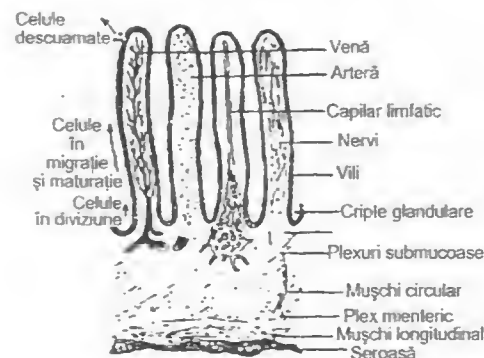


Fig. 9.31. Reprezentarea schematică a structurii peretelui intestinal.

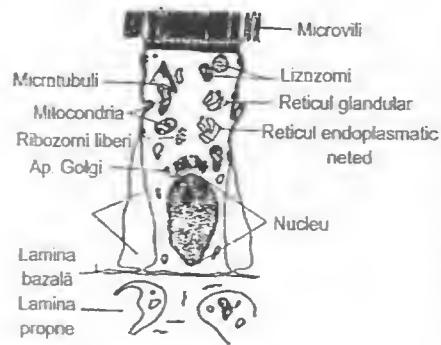


Fig. 9.32 Celula mucoasă a intestinului subțire.

Celulele epitelului intestinal sunt reprezentate de enterocite, celule caliciforme, celule Paneth și celule endocrine.

Enterocitele sunt celule cilindrice care prezintă în zona apicală o margine „în perie” prevăzută cu microvili (fig. 9.32).

Fiecare microvil conține o mare cantitate de enzime care, pe de o parte, continuă fenomenele de digestie începute de secrețiile: salivară, gastrică și pancreatică, iar, pe de altă parte, formează complexe funcționale cu transportorii membranei intestinale implicați în funcția de absorbție. Se remarcă, totodată, în enterocit bogăția de mitocondrii și lizozomi, organe cu rol, de asemenea, esențial în degradarea oxidativă a principiilor alimentare și metabolism.

Între microvilozități se găsesc filamente lungi glicoproteice (glicocalix), cu funcții în digestie și în protecția mucoasei.

Celulele caliciforme secretă mucusul intestinal.

Celulele Paneth constituie zonele de regenerare a epitelului intestinal (durata de viață a celulelor mucoasei este de 2-5 zile), având și rol secretor (lizozim).

Celulele endocrine intestinale fac parte din sistemul paracrin (APUD), a cărui existență a fost demonstrată în 1963 de Pearse. Aceste celule sunt structurate specific în mai multe tipuri celulare, care secretă diferențiat serotonină (celule enterocromafine), gastrină (celule „G”), secretină (celule „S”), enteroglucagon (celule „EG”) etc.

Intestinul subțire conține două tipuri de glande: glandele Lieberkühn și glandele Brünner.

Glandele Lieberkühn se găsesc între vilozități și sunt dispuse pe toată lungimea intestinelor subțire și gros. Glandele conțin toate tipurile de celule epiteliale intestinale descrise anterior, au formă tubulară și ajung până în corionul mucoasei. Glandele Brünner se găsesc numai la nivelul pilorului și duodenului, până la ampula Vater. Sunt glande de tip tubulo-acinos, foarte ramificate, cu canale excretore lungi.

Secreția sucului intestinal propriu-zis sau enteric: sucul intestinal se secretă în cantitate de 2-3 litri în 24 de ore și este fluid, incolor. În ultima porțiune a intestinului, datorită prezenței leucocitelor, celulelor descumate și bacteriilor, acesta este tulbure; pH-ul său variază de la 7 la 8,3, fiind mai acid la nivelul primei porțiuni a intestinului.

Sucul intestinal conține substanțe anorganice și organice.

Substanțele anorganice sunt reprezentate de concentrații crescute de clorură de sodiu și bicarbonați, ce-i conferă sucului intestinal puterea sa alcalină.

Dintre substanțele organice, cele mai importante sunt enzimele. Principala enzimă a intestinului subțire, *erepsina*, a fost extrasă din mucoasa intestinală (Cobnheim, 1901). Aceasta este o enzimă proteolitică ce acționează asupra polipeptidelor, dedublându-se în aminoacizi. Nu are efect asupra protidelor cu moleculă mai complexă. Erepsina este formată dintr-un grup de enzime endocelulare, denumite peptidaze, cu acțiune diferită asupra polipeptidelor, tripeptidelor și dipeptidelor. Astfel, carboxipeptidaza separă din polipeptide aminoacizii purtători ai grupării carboxil libere, iar aminopeptidaza dislocă aminoacizii prevăzuți cu grupări aminice. La rândul lor, tri- și dipeptidazele hidrolizează ultimele legături peptidice până la stadiul de aminoacizi liberi. O altă enzimă proteolitică este enterokinaza, care activează tripsinogenul, acționând în același timp și asupra polipeptidelor.

Nucleazele intestinale acționează asupra acizilor nucleici izolați de pe nucleoproteine de către tripsină, transformându-i în nucleotide. Nucleotidazele degradează nucleotidul în nucleozid și acid fosforic, iar nucleotidazele desfac nucleozidul în pentoză și baze purinice sau pirimidinice.

Mucoasa intestinală conține și *diastaze*, care hidrolizează diholozidele, transformându-le în hexoze. Astfel, invertaza transformă zaharoza în glucoză și fructoză, lactaza scindează lactoza în glucoză și galactoză, iar maltaza dedublează maltoza în două molecule de glucoză.

Lipaza intestinală acționează asupra grăsimilor neutre, fracțiunea pe care o dedublează reprezentând numai 2-5% din totalul grăsimilor digerate.

Sucul recoltat din fistula intestinală are o activitate enzimatică redusă. În schimb, extractele de mucoasă intestinală și sucul intestinal obținut în timpul digestiei sunt bogate în enzime, ceea ce denotă că enzimele ajung în tubul digestiv odată cu celulele epiteliale descumate.

De fapt, ciclul vital, de reînnoire a unei celule epiteliale, este, așa cum s-a arătat anterior, destul de rapid (aproximativ 4-5 zile), astfel încât într-o lună întreaga mucoasă a intestinului subțire poate fi remaniată.

Digestia intestinală, proces complex, realizat prin acțiunea succesivă și combinată a secrețiilor pancreatice și enterocitare, are loc în trei etape: luminală, membranară și intracelulară.

Etapa luminală se desfășoară în lumenul intestinal sub acțiunea enzimelor enterocitare puse în libertate odată cu distrugerea celulelor intestinale descumate. Acest tip de digestie este de mică importanță din punct de vedere al participării sucului intestinal propriu-zis, acțiunea majoră de digestie intraluminală fiind asigurată de secrețiile bilio-pancreatice.

Substanțele alimentare, digerate parțial în lumen sub acțiunea enzimelor pancreatice, vor fi hidrolizate în continuare până la stadiul de monomeri, prin digestia membranară la nivelul marginii „în perie” a enterocitelor, de către enzimele de la suprafața membranei apicale a acestora.

Digestia de membrană (digestia de contact), apărând pe fața externă a membranei celulare, se aseamănă și cu digestia intracelulară. La nivelul epitelului intestinal are loc scindarea oligozaharidelor datorită enzimelor hidrolitice sintetizate în ribozomi (scindează zaharoza, sucroza și maltoza). Există și fenomene de degradare peptică, deoarece pe suprafața liberă a mucoasei se găsesc cantități mari de aminopeptidază. Trigliceridele pot fi scindate în di- și monogliceride, deoarece mari cantități de esterază și lipază se află, de asemenea, în partea liberă a mucoasei intestinale.

Hidroliza unor esteri ai acidului fosforic (ATP, hexozofosfați, glicerofosfați, fosfonucleotide) este posibilă datorită marilor cantități de fosfataze alcaline prezente aici.

Ultima etapă, **etapa intracelulară**, acționează asupra unor oligomeri absorbiți ca atare și are loc în enterocit sub influența enzimelor citoplasmice și lizozomale.

În realitate, aceste ultime două etape, membranară și intracelulară, sunt strâns cuplate cu funcția de absorbție intestinală. Analiza separată a celor două fenomene este mai mult de importanță teoretică, procesele fiind intens corelate și având loc practic aproape simultan.

Enzimele marginii „în perie” și cele localizate la nivelul filamentelor glicocalixului sunt distruse și resintetizate de câteva ori de către enterocit, în decursul duratei sale de viață.

Pe de altă parte, glandele intestinale generează continuu celule care le înlocuiesc pe cele din extremitatea liberă a vilozităților ce se desprind și cad în lumen.

Glandele Lieberkühn secretă un lichid cu pH cuprins între 6-7, cu rol neprecizat, fiind probabil solvent pentru producția de digestie și facilitând în acest mod absorbția.

Se pare, totuși, că celulele criptelor Lieberkühn secretă și direct în lumenul intestinal o enzimă, anume enterokinaza, ce activează, așa după cum s-a arătat anterior, transformarea tripsinogenului în tripsină.

Glandele Brünner elaborează o secreție mucoasă, cu un conținut ridicat de bicarbonat cu rol de protecție a mucoasei intestinale față de acțiunea peptică a sucului gastric.

9.2.3.8. Reglarea secreției intestinului subțire

Reglarea nervoasă a secreției intestinale se realizează prin intervenția în primul rând a reflexelor mienterice locale, declanșate îndeosebi de distensia pereților intestinului, dar și prin excitarea tactilă sau iritarea mucoasei intestinale. Răspunsul secretor intestinal este, astfel, direct proporțional cu cantitatea chimului intestinal.

Controlul vegetativ extrinsec este asigurat de vag și simpatic. Secționarea nervilor extrinseci ai intestinului nu reduce secreția produsă prin excitația mecanică, aceasta continuând sub formă de secreție abundentă paralică. În cursul digestiei, secreția intestinală crește atât după stimularea vagului, cât și după extirparea simpaticului, fapt ce dovedește influența excito-secretoare a parasimpaticului și inhibitoare a

simpaticului. Creșterea secreției intestinale după extirparea simpaticului poate fi explicată și prin aceea că secționarea acestuia duce la pierderea tonusului vasomitor, la vasodilatație și permeabilitate crescută capilară în zona denervată. Faptul că în intestinul subțire, cât și în cel gros pilocarpina și ezerina intensifică secreția, iar atropina o deprimă, vine în favoarea inervației secretoare colinergice. În fazele interdigestive, puterea inhibitorie a splanhnicilor domină pe aceea excitatoare a pneumogastricilor (fig. 9.33).

Secreția intestinală este stimulată și pe cale umorală. Astfel, la animalele la care s-a realizat denervarea completă a unui segment jejunal în condițiile transplantării în altă regiune a corpului, se constată o secreție însemnată a mucoasei fragmentului respectiv în timpul digestiei. Aceasta dovedește existența unei reglări umorale a digestiei care, de altfel, s-a demonstrat ulterior a fi asigurată de o serie de hormoni. Astfel, Nasset a izolat din mucoasa duodenală un hormon numit enterocrină, ce se eliberează în cursul digestiei și care, pe cale circulatorie generală, ajunge la enterocite și glandele intestinale, stimulându-le secreția. Creșterea sucului intestinal privește atât volumul, cât și titrul său enzimatic.

S-a emis, de asemenea, ipoteza existenței unui hormon capabil să excite secreția glandelor Brünner, numit duocrinina, la care se mai adaugă, cu același sens de acțiune, gastrina, CCK-PZ și secretina.

Secretina acționează în sens excitator asupra secreției intestinale și inhibitor asupra absorbției de apă și sodiu.

Un alt hormon cu acțiune stimulatorie asupra secreției intestinale este VIP (polipeptidul vasoactiv intestinal).

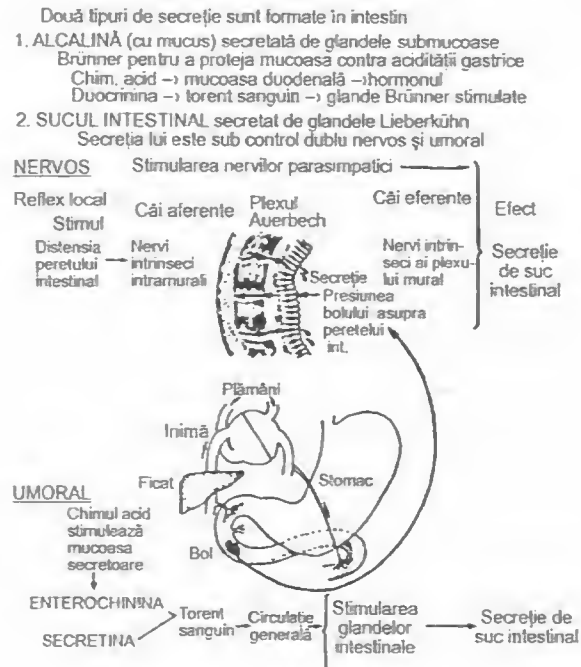


Fig. 9.33 Reglarea secreției intestinale.

9.2.3.9. Motilitatea intestinului subțire

Intestinul subțire are o lungime de aproximativ 5 m, chimul traversează intestinul subțire într-o perioadă de 2-4 ore. Primii 25 cm din intestinul subțire sunt ocupați de duoden; restul intestinului subțire este divizat în jejun și ileon.

Intestinul subțire este sediul proceselor de digestie și absorbție. Mișcările de la acest nivel asigură chimul cu sucurile digestive, menține chimul în contact cu suprafața absorbțivă a microvilozităților și propagă chimul dincolo de colon.

Comportamentul contractil al intestinului subțire. Cel mai frecvent tip de mișcare a intestinului subțire este segmentarea. Aceasta se caracterizează prin contracții localizate ale inelelor de mușchi neted circular. Când segmentele contractate se relaxează, segmentele vecine se contractă (fig. 9.34 B). Segmentarea are loc la o frecvență similară cu cea a undelor lente ale intestinului subțire. Frecvența contracțiilor segmentare nu este constantă, un grup de contracții segmentare fiind urmate de o perioadă de repaus. Segmentarea realizează amestecarea efectivă a chimului cu secrețiile digestive și menține chimul în contact cu suprafața mucoasei.

La nivelul jejunului, activitatea contractilă are loc sub forma unor contracții puternice (numite contracții ritm-minut), separate de intervale în care contracțiile sunt slabe sau absente.

Undele peristaltice reprezintă contracții progresive ale diverselor sectoare de mușchi neted circular. Contracțiile se propagă de-a lungul tractului gastro-intestinal în sens aboral (fig. 9.34 A).

Comportamentul contractil al intestinului subțire se declanșează după ingestia alimentară, când apar contracții puternice separate de perioade de liniște. Acest tip de activitate contractilă se numește complex motor migrator (CMM) și se propagă de la nivelul stomacului la ileonul terminal.

MMC prezintă patru faze:

- faza 1, faza liniștită, se caracterizează prin unde lente cu foarte puține potențiale de acțiune și foarte puține contracții;
- faza 2 se caracterizează prin potențiale de acțiune neregulate, care cresc în intensitate și frecvență;
- faza 3 este perioada de activitate electrică și contractilă intensă, care durează 3-6 minute;
- faza 4 este perioada în care activitatea electrică și contractilă scade rapid.

Originea unui CMM este la nivelul stomacului prin impulsuri vagale pornite de la acest nivel. Unii hormoni cum ar fi: motilinel, substanța P, somatostatina și neurotensina inițiază CMM puternice. Propagarea MMC este influențată major de neuronii enterici (dacă neuronii enterici sunt blocați la un anumit nivel al intestinului subțire MMC nu se propagă peste acest nivel) (fig. 9.34 a).

Reflexele intestinale. Reflexele de la nivelul intestinului subțire depind de funcționarea nervilor intrinseci și extrinseci.

Prezența chimului în intestinul subțire determină contracția orală a intestinului subțire și relaxarea aborală de acesta; acest răspuns se numește „legea intestinului”.

Supradistensia unui segment de intestin relaxează musculatura netedă din restul intestinului. Acest răspuns este cunoscut sub numele de reflexul intestino-intestinal.

Stomacul și porțiunea terminală a ileonului interacționează reflex. Distensia ileonului scade motilitatea gastrică; răspunsul este numit reflexul ileo-gastric.

Creșterea activității secretorii și motorii a stomacului determină o intensificare a motilității ileonului terminal; se numește reflexul gastro-ileal.

Evacuarea ileonului. Sfincterul ileo-cecal separă porțiunea terminală a ileonului de cec. În mod normal, acest sfincter este închis, dar undele peristaltice din porțiunea terminală a ileonului produc relaxarea sfincterului și mici cantități din chim trec în cec. De asemenea, distensia ileonului terminal relaxează reflex sfincterul. În schimb, distensia cecului produce contracția acestui sfincter, prevenind golirea suplimentară a ileonului. În condiții normale, sfincterul ileo-cecal permite chimului ileal să pătrundă în colon, astfel încât să poată avea loc procesele de absorbție a apei și a sării la acest nivel.

Motilitatea interdigestivă. Complexul motor migrator (CMM) evidențiază pe înregistrarea într-un singur punct trei faze (15-30 min): absența contracțiilor (I), contracții neregulate (II) și contracții regulate (III; 8-15 min). CMM reprezintă un mod ciclic de activitate electrică a intestinului. CMM este compus din două tipuri de unde:

- lente, ritmice, permanente, cu aspect sinusoidal, constituind ritmul electric de bază;
- rapide, sporadice, care se suprapun peste cele lente și se numesc potențiale-vârf.

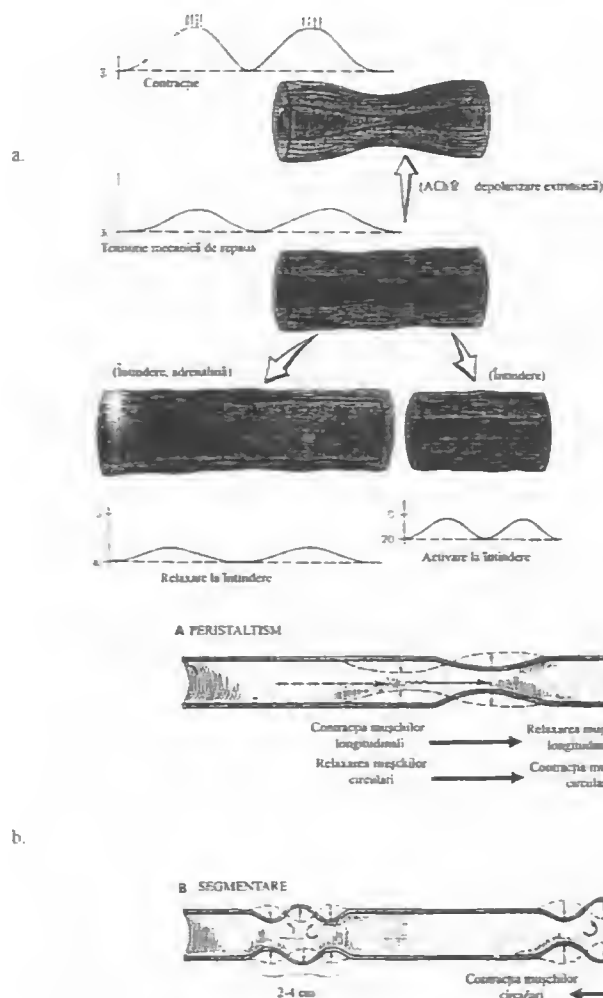


Fig. 9.34 a. Factorii care reglează contractilitatea intestinală. Controlul extrinsec este exercitat de parasimpatic. Răspunsul intrinsec implică activarea indusă de întindere și relaxarea indusă de întindere. b: Forme de motilitate intestinală. A, Peristaltica implică unde de contracție coordonate, care se deplasează pe distanțe variabile și realizează propulsia conținutului intestinal. B, Segmentarea implică contracții alternativ cu relaxări ale stratului muscular circular al intestinului, cu rol de amestec al conținutului.

Contracțiile sunt datorate potențialelor-vârf suprapuse peste undele lente.

Lungimea de intestin pe care se manifestă CMM se numește front de activitate; în acest cadru se propagă contracțiile peristaltice ce realizează propulsia conținutului. CMM este inițiat ca o accentuare a contracției antrale obișnuite (la 2-3 ore după masă) și se propagă în aval cu o viteză în scădere de la 3-6 cm/min în duodea la 1-2 cm/min în ileon, durata propagării fiind ca urmare de 80-120 min (la om); complexe nu se suprapun în timp și se repetă până la o nouă ingestie. Viteza de propagare a activității electrice/contractile în cadrul CMM este de ~10 ori mai mare. Faza II apare la cele două extremități ale frontului de activitate și reflectă incapacitatea unor unde lente de a iniția complex propulsor (la capătul proximal) sau distanța diferită de propagare a complexelor propulsoare (la capătul distal). CMM este rezultatul undelor lente din membrana muscularii netede și al activității sistemului nervos enteric (înlăturarea controlului simpatico-parasimpatic are efect).

Nu se cunoaște natura semnalului de inițiere a activității de tip interdigestiv (la declanșare crește nivelul de motilitate). Rolul acestui tip de motilitate este de înlăturare a resturilor nedigerabile.

Motilitatea digestivă. Perioada digestivă (2-3 ore de la ingestie) se caracterizează prin unde peristaltice propagate pe distanțe scurte (contracții segmentare, cu efect de amestecare și propulsor). Trecerea de la activitatea de tip interdigestiv la cea de tip digestiv se face prin comenzi centrale (declanșate de ingestie; absente la hrănire parenterală) transmise pe cale vagală.

Propulsia în masă. Contracțiile migratoare gigaote durează 18-20 s (mai multe unde lente), se propagă cu ~1 cm/s pe distanțe mari (mai multe porți deschise în sistemul nervos enteric) și sunt mai puternice decât contracțiile peristaltice obișnuite (probabil datorită neuronilor motori excitatori din circuitul accesoriu). Ele se propagă retrograd în cadrul programului de vomă. Se pot asocia cu dureri abdominale (crampe) și diaree. Asigură fiziologic propulsia în masă (în special în intestinul gros) și sunt specializate pentru îndepărtarea stimulilor oocivi.

9.2.3.10. Reglarea motilității intestinale

Motilitatea intestinală este asigurată miogen, nervos și umoral.

La baza fenomenelor mecanice intestinale segmentare stă activitatea miogenă spontană a însăși fibrelor musculare netede. Ea este dependentă numai de factori metabolici în condițiile absenței reglării nervoase și umorale (condiții experimentale) și influențată, modulată și reglată neuro-umoral în condiții fiziologice.

Reglarea nervoasă este reflexă și se realizează prin inervația intrinsecă și extrinsecă.

Reglarea locală intrinsecă asigură îndeosebi mișcările peristaltice, fapt dovedit de persistența acestora în condițiile denervării extrinseci vago-simpatice.

Undele peristaltice sunt declanșate îndeosebi de plexurile Auerbach, ai căror receptori se găsesc în mucoasă. Reflexul mienteric peristaltic este asigurat pe o cale nervoasă continuă pentru fibrele longitudinale și una discontinuă, întreruptă de sinapsă, pentru fibrele circulare.

Activitatea în totalitate a plexurilor intramurale este în final unitară, ele integrând aferențele senzitive parietale de la nivelul plexului submucos Meissner cu neuronii eferenți ai plexului mucoas Auerbach.

Stimularea motricității intestinale în absența inervației extrinseci este determinată mecanoic (distensie, atingerea mucoasei) și chimic (soluții hipotone, hipertone și acide).

Activitatea neuro-musculară intrinsecă a intestinului subțire, care are rol numai în declanșarea mișcărilor, este controlată și coordonată de inervația extrinsecă. Aceasta, fiind dublă și antagonistă, determină, în cazul fibrelor colinergice (nervul vag), creșterea frecvenței și amplitudinii contracțiilor musculare, iar, în cazul fibrelor adrenergice (nervii splanhnici), inhibarea tonusului și motilității intestinale. Cele două sisteme acționează simultan, dar predomină tonusul nervilor vagi.

Dublă vagotomie iotratrică încetinește, de altfel, tranzitul intestinal, în timp ce simpatectomia este fără efect decelabil.

Centrii intestinomotori se găsesc în bulb pentru intestinul subțire, iar cei intestinoinhibitori în tractul intermedio-lateral D₄-L₁ pentru nervii splanhnici și la nivelul L₁-L₃ pentru nervul hipogastric (splanhnicul

pelvin). Creșterea bruscă a presiunii într-un punct oarecare al intestinului subțire inhibă momentan tonusul și mișcările întregului tub digestiv, de la cardia la ansa sigmoidă. Este o reacție neuro-reflexă de protecție realizată de reflexul inhibitor entero-enteric.

Teoria acțiunii antagoniste stimulatoro-inhibitoare de tip vago-simpatic asupra motilității intestinale este înlocuită, după opinii recente, cu sistemul antagonic stimulator-inhibitor de tip colinergic-peptidergic/purinergic, pentru a căruia existență s-au acumulat multe dovezi.

Influențe nervos-superioare pot acționa asupra motilității. Stările emoționale intense sunt însoțite de modificări ale amplitudinii activității motorii intestinale. În general, reacțiile se traduc printr-o diminuare sau creștere a activității.

Astfel, reacțiile de durere, frică, teamă produc paliditatea mucoasei, diminuarea secreției de mucus și o inhibiție a motilității. Pe de altă parte, furia, agresivitatea manifestă sau subconștientă se asociază, în general, cu hiperemia, congestia și motilitatea.

S-a pus în evidență și intervenția proceselor umorale în reglarea motricității intestinale. Astfel, mișcările intestinului sunt inhibitate de grăsimi, soluții hipertone de glucoză, zaharoză sau galactoză, ajunse în duoden, și această inhibare este valabilă și pentru un buzunar intestinal transplantat, lipsit de inervație extrinsecă. Această inhibiție nu este însă rezultatul unui produs de digestie a lipidelor, căci injecția intravenoasă a unei soluții fine de lipide rămâne fără răspunsul motilității intestinale.

Reglarea umorală a motilității intestinului subțire se realizează prin intervenția îndeosebi a hormonilor intestinali, dar și a unor amine biogene sau a altor substanțe biologice active.

Astfel, motilul, gastrina, CCK-PZ, serotonina, prostaglandinele (PGE, PGF) stimulează motilitatea intestinală, în timp ce secretina și VIP o inhibă.

De asemenea, unele glande endocrine au o acțiune inhibitoare asupra motilității intestinale, ca suprarenala și gonadele (conștupația din hiperfoliculinemie).

Așa după cum s-a arătat și la reglarea digestiei gastrice, există un hormon eliberat de mucoasa duodenală, enterogastrona, care modulează indirect activitatea de evacuare a intestinului subțire superior prin intermediul influenței inhibitoare pe care o are asupra motricității gastrice. Enterogastrona este un polipeptid ce a fost extras de Ivy (1928) din mucoasa duodenală la contactul acesteia cu uleiul de măsline. Unii autori îi contestă specificitatea, considerându-l încă ipotetic. O serie de substanțe farmacodinamice, cum sunt pilocarpina și prinstigmina, împreună cu unele ce se găsesc în pereții tractului digestiv (histamina, bradikinină) intensifică peristaltismul intestinal, în timp ce altele, ca adrenalina, beladonna, îl moderează.

9.2.3.11. Secreția și motilitatea intestinului gros

Intestinul gros (colonul) este cuprins între cec și anus, fiind format topografic din următoarele porțiuni: cec, colon ascendent, colon transvers, colon descendent, colon sigmoid, rect și canal anal (fig. 9.35). Lungimea este de aproximativ 1,4–1,8 m.

Din punct de vedere funcțional, cecul, colonul ascendent și hemicolonul transvers drept formează colonul proximal, cu funcție absorbtivă, în timp ce restul segmentelor până la anus formează colonul distal, cu funcții de depozitare și evacuare a materiilor fecale.

Structural, mucoasa colonului este mai groasă comparativ cu cea a intestinului subțire și nu posedă valvule conivente și vilozități.

Celulele cu margine „în peric” sunt lipsite de granule secretoare, iar la partea apicală microvilii sunt mai mari și mai scurți. Glandele Lieberkühn secretă mucus, iar celulele endocrine sunt rare, cu excepția apendicelui.

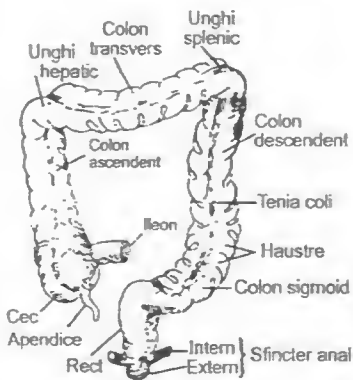


Fig. 9.35 Componentele intestinului gros.

Fibrele musculare longitudinale externe sunt dispuse în trei benzi late, numite taenia coli, la distanțe egale între ele.

Fiind mai scurte decât lungimea totală a intestinului gros, colonul apare format din punți succesive, numite haustre.

La nivelul sigmoidului și rectului, teniile difuzează, formând un strat muscular continuu.

Canalul anal este prevăzut cu două sfinctere: unul intern, circular, neted și unul extern, striat, ce-l înconjură pe primul.

Funcția principală a colonului proximal este cea de depozit al constituenților inutilizabili pentru organism din chimul intestinal și de absorbție hidroelectrolitică și vitaminică, iar cea a colonului distal de tranzit al resturilor alimentare și sediu al activității microorganismelor intestinale.

Secreția intestinului gros. Produsul de secreție al mucoasei colice este un lichid redus cantitativ, cu pH alcalin (8–8,4), foarte vâscos și lipsit de enzime. Are rolul de a favoriza atât trecerea resturilor reabsorbite ale chimului ileal în cec, cât și aderarea acestora între ele în vederea constituirii bolului fecal, protejând în același timp mucoasa intestinului gros de iritații sau traumatisme mecanice și chimice (toxine și acizi rezultați din activitatea florei bacteriene intestinale).

Deși cantitatea de mucus secretată de intestinul gros este mică în condiții fiziologice, în cazul mucoasei iritate chimic sau mecanic aceasta este capabilă să secrete cantități mari de mucus, apă și electroliți, ca reacție de apărare, favorizând atât diluarea, cât și eliminarea agenților cauzatori.

Reglarea funcției secretoare a colonului. Este asigurată extrinsec de nervii erectori și simpatici, iar intrinsec de plexurile menterice.

Stimularea nervilor erectori determină o secreție mucoasă abundentă, prin mecanism colinergic, în timp ce excitarea simpaticului diminuează acest răspuns. Reglarea prin plexurile menterice este asemănătoare celei de la intestinul subțire.

Motilitatea intestinului gros. Colonul prezintă o activitate electrică, ce este încă insuficient de clar corelată cu activitatea mecanică.

Există un ritm electric bazal (format din unde lente), potențiale programate de tipul legii „totul sau nimic”.

Activitatea electrică generează activitatea motorie a colonului, stând la baza tipurilor de mișcare ale acestuia.

Intestinul gros prezintă mișcări de amestecare, mișcări peristaltice și mișcări de transport în masă. Aceste mișcări sunt adaptate funcțiilor sale, de resorbție a apei și propulsare a conținutului devenit consistent.

Analiza grafică a mișcărilor intestinului gros evidențiază existența a patru forme de mișcare:

- mișcări de tip I, care reprezintă o activitate locală, nepropagată, cu frecvență rapidă și care echivalează cu mișcările pendulare ale intestinului subțire. Ele exercită o presiune de 1,2–6 cmH₂O. Fără a avea efect propulsiv, aceste mișcări amestecă bolul intestinal în principal la nivelul cecului și colonului proximal;

- contracțiile de tip II sunt mai desfășurate și mai energice; ele se propagă de o parte și de alta a punctului de unde iau naștere, sunt expresie a activității fibrelor circulare și dezvoltă o presiune de 10–20 cmH₂O. Rolul lor este de a intimiza conținutul intestinal cu mucoasa intestinală, favorizând absorbția apei;

- contracțiile de tip III constau în variații lente ale tonusului muscular, pe care se grefează contracțiile de tip I și II. Ele creează o ușoară creștere a presiunii de la 3 la 5 cmH₂O (fig. 9.36);

- contracțiile de tipul IV sunt specifice intestinului gros, puternice, în masă, sub formă de salve, puțin frecvente (de 3–4 ori pe zi). Unde antiperistaltice slabe se pot întâlni mai ales la nivelul regiunii ileo-cecale.

Mișcările segmentare sunt constituite din unde de tipurile I și II, apărând echidistant între ele, la fiecare 2,5 cm. Sunt realizate de fibrele circulare și au caracter staționar, iar, când prezintă intensitate mare, pot obstrua aproape complet lumenul intestinal. Frecvența acestor mișcări

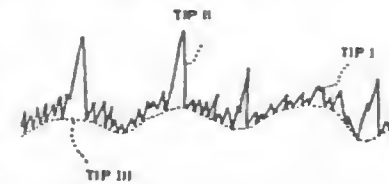


Fig. 9.36. Tipurile de mișcare ale intestinului gros.

este de 2-4 contracții/min și se asociază cu contracția teniilor. Ele realizează amestecarea conținutului intestinal, deplasarea lui pe distanțe scurte în ambele sensuri și favorizarea absorbției.

Mișcările peristaltice ale intestinului gros constau din contracții ale musculaturii circulare, care se deplasează aboral, propulsând conținutul colonului spre rect. Contracțiile sunt precedate de relaxări, încât mișcările au aspectul de valuri. Frecvența este scăzută comparativ cu cele din intestinul subțire, și anume 3-12 contracții pe minut, ritmul contracțiilor crescând în sensul de la cec spre sigmoid.

Mișcările de transport în masă sunt specifice numai intestinului gros și apar de două-trei ori pe zi! Ele corespund undelor de tip IV, au aspect peristaltic și sunt foarte puternice, putând crește presiunea intraluminală în zona de producere până la 100 mmHg. Sunt declanșate de destinderea stomacului (reflexul gastro-colic), duodenului (reflexul duodeno-colic) și colonului, dar pot apărea și ca urmare a unor emoții puternice sau excitanți condiționați.

Alimentele sunt preluate de către cec la patru ore după ingestie, procesul continuându-se încă timp de 4-5 ore.

Timpul de tranzit colonic al resturilor alimentare, ca urmare a acțiunii conjugate a tuturor tipurilor de mișcări, este de aproximativ 6 ore de la ingestie până la unghiul hepatic al colonului, 9 ore până la unghiul splenic și 12 ore până la colonul sigmoid.

Eliminarea totală a resturilor alimentare ale unui prânz-test se face în 5-7 zile, în primele trei zile tranzitând prin tubul digestiv aproximativ 70% din cantitatea ingerată.

Reglarea funcției motorii a intestinului gros. Se realizează asemănător celei a intestinului subțire. Ca și aici, celulele musculaturii netede ale colonului au capacitatea de a se contracta spontan și autonom în absența năcării stimul nervos sau umoral, dar cu o frecvență mai mică.

În ceea ce privește reglarea nervos-reflexă, colonul proximal are un grad mai mare de automatism, putând să-și efectueze aproape normal funcția motorie în condiții de vagotomie, în timp ce colonul distal prezintă în acest sens posibilități mai reduse.

Rolul predominant al inervației intrinseci este inhibitor; în absența acesteia intestinul gros prezintă contracții tonice.

Inervația parasimpatică stimulantă este asigurată de vag pentru colonul proximal (parasimpaticul crauan) și de nervii erectori pentru colonul distal (parasimpaticul sacrat). Nervii splanhnici asigură inervația simpatică-inhibitoare.

Ambele componente ale inervației extrinseci vag-simpatice influențează motilitatea colonului prin intermediul neuronilor colinergici și, respectiv, adrenergici sau purinergici ai plexurilor intramurale.

Factori umorali cu rol stimulator implicați în reglarea motilității intestinului gros sunt: gastrina (care contribuie la realizarea reflexelor gastro- și duodeno-colice), serotonina, CCK.

Participări dovedite, dar încă incomplet clarificate, au enteroglucagonul, motilinul, endorfinele și GIP (gastro-intestinal polipeptid).

O atenție aparte trebuie rezervată conținutului în fibre vegetale al rației alimentare. Prezența lor zilnică în alimentație este deosebit de avantajoasă pentru organism, întrucât, pe lângă faptul că au un rol stimulator și regulator al motricității intestinale, contribuie la fixarea și eliminarea substanțelor toxice, cancerogene etc.

9.2.3.12. Activitatea bacteriană intestinală

Flora microbiană intestinală este indispensabilă vieții, având importante funcții în menținerea homeostaziei organismului.

Germenii microbieni sunt aduși odată cu alimentele și colonizează variabil segmentele tubului digestiv începând din cavitatea bucală (densitate 10^4 germeni/ml salivă, 10^4 germeni/ml în duoden, 10^{11} germeni/ml în cec, 10^6 - 10^{11} în materiile fecale).

În colonul proximal predomină flora de fermentație, aerobă, care degradează substanțele glucidice rămase neatacate până la acest nivel. Producși rezultați sunt: acizi organici, hidrogen, CO_2 .

Colonul distal este populat îndeosebi cu floră de putrefacție, anaerobă, cu acțiune degradativă asupra proteinelor nedigerate, pe care le transformă până la stadiul de aminoacizi.

Din acest ultim proces rezultă o serie de substanțe toxice pentru organism, de tipul indol, scatol, amoniac.

În afara rolului digestiv enzimatic, flora intestinală posedă și alte importante funcții, cum sunt:

a) sinteza și absorbția vitaminelor hidrosolubile (vitaminele: B₆, B₂, B₁₂, H, acidul pantotenic) și liposolubile (vitamina K);

b) asigură procesul de deconjugare a diglucuronidului (bilirubină glucuronocnjugată) până la transformarea acestuia în stercobilină;

c) deconjugarea acizilor biliari, cu eliminarea acizilor dezoxicolic și litocolic prin materiile fecale, pe de o parte, și reabsorbția în circuitul hepato-entero-hepatic a acidului colic în vederea refolnsirii lui, pe de altă parte;

d) stimularea funcției de apărare a organismului, atât prin influența creșterii sintezei de imunoglobuline A și M de către celulele limfide ale peretelui intestinal, cât și prin asigurarea integrității și morfologiei normale a epitelului colonului.

9.2.3.13. Defecația

Cantitatea medie a materiilor fecale eliminate zilnic variază de la 30 g pentru sugar, la 125 g pentru adult, în funcție de alimentația, vârsta, secrețiile digestive și gradul de absorbție intestinală a individului.

Alimentația vegetariană determină creșterea volumului și greutateii materiilor fecale, în timp ce alimentația rafinată preparată și carnată scade acești parametri. Materiile fecale conțin în proporție de 75% apă și 25% reziduu solid, format din substanțe organice și anorganice, la un pH mediu de aproximativ 7 (tabelul 9.VI).

TABELUL 9.VI

Compoziția materiilor fecale în condițiile unei alimentații mixte

Substanțe	Procente din greutatea totală
Apă	75
Reziduu	25
Celuloză, alte fibre nedigerate	variabil procente din reziduu
Microbi	30
Substanțe anorganice (în special săruri de calciu și fosfor)	15
Grăsimi	5
Celule mucoase descumate, mucus, enzime digestive	variabil

O parte însemnată din cantitatea totală a materiilor fecale este de origine nealimentară, dndvă fiind faptul că în inaniția de durată eliminarea acestora continuă.

Defecația este un act reflex mntor, extrem de complex, realizat de regiunea terminală sigmoido-rectală a colonului distal și care constă în eliminarea la exterior a materiilor fecale.

Acest act este coordonat de centri medulari și controlat cortical. Cea mai mare parte din timp, rectul este aproape gol, parțial datorită contracției tonice a unui sfincter neted, slab funcțional, situat la aproximativ 20 cm de anus, la joncțiunea dintre sigmoid și rect.

Când mișcările de transport în masă ale colonului împing conținutul intestinului gros distal în rect, este inițiat reflexul defecației, în care o importanță deosebită prezintă activitatea sfincterului anal intern și a celui extern.

Sfincterul anal intern, involuntar, este un mușchi neted, dispus circular în peretele intern al anusului, ce se găsește relaxat atunci când colonul este destins.

Sfincterul anal extern menținut, de asemenea, permanent în contracție tonică este constituit din fibre striate, voluntare. El este localizat în jurul sfincterului neted și parțial distal de acesta, fiind sub control nervos somatic.

Senzația și reflexul de defecație sunt declanșate de umplerea și distensia ampulei rectale de către materiile fecale.

Odată atins pragul critic al distensiei peretelui rectal, se declanșează „reflexul de defecație intrinsec”, prin semnale spre și dinspre plexurile mienterice, ce vor controla în această primă fază inițierea de contracții slabe peristaltice ale colonului descendent, sigmoidului și rectului. Undele contractile propagate determină relaxarea sfincterului anal intern, ceea ce facilitează pătrunderea pentru un timp scurt a conținutului fecal în canalul anal.

În condițiile determinate de ambianța și viața socială, individul consimte sau amână actul defecației.

În cazul în care acesta poate avea loc, reflexul slab mienteric descris anterior se intensifică, realizând „reflexul de defecație parasimpatic” prin creșterea frecvenței impulsurilor aferente rectale, care ajung pe calea fibrelor parasimpatice ale nervilor pelvici și pe calea nervilor somatici rușinoși interni la centrul sacrat parasimpatic al defecației S_2-S_4 . De aici, prin fibre parasimpatice, pleacă impulsurile eferente, care intensifică peristaltismul colonului descendent, sigmoidului și rectului, concomitent cu creșterea gradului de relaxare a sfincterului anal intern (ambele efecte sunt de natură parasimpatică) (fig. 9.37).

În același timp, impulsurile aferente transmise la măduvă ajung și la centrul bulbar al defecației (lângă centrul vomei), și, de asemenea, la hipotalamus și cortex, determinând asocierea la reflexul defecației a unor acte favorizatoare parțial conștiente. Astfel, are loc o inspirație profundă, gîta se închide, iar diafragma coboară până la limitele maxime, la care se asociază contracția musculaturii abdominale, toate acestea având ca efect creșterea presiunii intraabdominale. Aceasta facilitează creșterea presiunii intrarectale de la 20 mmHg în condiții normale, la 60–70 mmHg și chiar 100–200 mmHg.

Concomitent, are loc relaxarea musculaturii planșeului pelvin, contracția fibrelor longitudinale rectale și tracțiunea în sus a regiunii perineale, cu scurtarea canalului anal. Sfincterul extern striat se relaxează sub control voluntar, iar mușchii ridicători anali se contractă reflex, determinând ridicarea acestora deasupra bolului fecal, pentru ca, în finalul defecației, comprimarea pereților anali să ducă la eliminarea conținutului fecal.

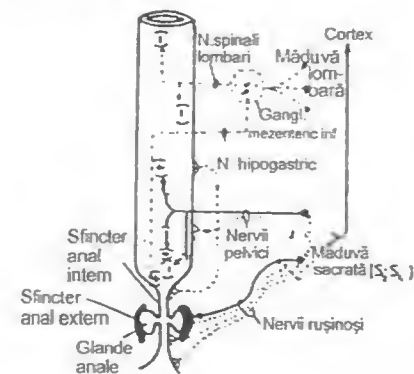


Fig. 9.37. Inervația colonului terminal și a sfincterului anal.

Dacă din diverse motive defecația nu poate avea loc, acest act poate fi inhibat voluntar prin menținerea sfincterului extern contractat. În același timp, impulsurile de distensie ano-rectală se transmit pe calea simpatică senzitivă a nervilor hipogastrici la un centru inhibitor lombar al defecației din L_2-L_4 (simpatic). De aici se descarcă impulsuri pe calea nervilor hipogastrici (fibre motorii), care determină scăderea peristaltismului colonului descendent și contracția sfincterului anal intern. O parte din materiile fecale vor fi trecute înapoi în rect, în sigmoid și colonul descendent, prin mișcări antiperistaltice.

Inhibarea voluntară a defecației are ca urmare dispariția ei pentru câteva ore.

La om, controlul cortical se exercită începând cu a 15-a – a 20-a lună după naștere, sub influența educației.

Frecvența defecației este variabilă (1–3 ori pe zi), importanța controlului cortical fiind dovedită și de condiționarea reflexului în funcție de diverși factori (timp, orarul meselor).

9.2.4. AERUL DIGESTIV

Tractul digestiv normal conține în jur de 150 ml de gaz (stomacul 50 ml, colonul 100 ml, intestinul subțire nu conține gaze). Aerul din stomac rezultă prin cumulara lui la fiecare deglutiție, la care se adaugă cel conținut în saliva mucoasă și în alimente. O mare parte din aer este eliminată prin eructații. În rare cazuri, prin acumularea în stomac, poate umple tot hipocondrul stâng. Aerul stomacal conține 15–16% oxigen, 5–9% CO_2 și restul azot.

Oxigenul este aproximativ în echilibru cu cel din sângele capilar; cum aerul înghițit conține 21% oxigen, rezultă că o parte este absorbit în stomac. Azotul este absorbit lent, dar nu în totalitate, pentru că lichidul tisular este deja saturat în azot la presiunea ambiantă. Dacă se diminuează cantitatea de azot dizolvat în țesuturi, prin respirarea de către un subiect a unui amestec de gaze sărac în azot, azotul este rapid absorbit. Anhidrida carbonică difuzează în stomac din sânge și însoțește secreția acidă a stomacului.

Aerul ce nu a fost eliminat prin eructație trece în intestinul subțire, de unde este absorbit rapid sau trece în colon. Aerul din acest segment intestinal conține 70% N_2 , 6–9% CO_2 și 10–12% oxigen. Produsele de fermentație (hidrogen, metan, hidrogen sulfurat) sunt obișnuit absente în intestinul subțire, dar ele pot constitui 10% din total atunci când are loc o fermentație favorizată de obstrucție intestinală.

Colonul uman conține 100 ml gaz, ce crește atunci când presiunea ambiantă diminuează. În compoziția sa, oxigenul aproape lipsește, azotul atinge 50%, anhidrida carbonică poate atinge 40%, iar restul este format din gaze de fermentație. Presiunea crescută a CO_2 este probabil rezultatul reacției bicarbonatului din secrețiile ileale și colice cu produsele acide de fermentație.

9.2.5. ELEMENTE DE NEUROFIZIOLOGIE GASTRO-INTESTINALĂ

La nivel gastro-intestinal, controlul nervos se exercită coordonat asupra contracției musculaturii netede viscereale și vasculare, precum și asupra proceselor de secreție și absorbție. De exemplu, vasodilatația susține secreția de apă, electroliți și mucus premergător contracției propulsive. Activitatea integrată a eferentilor este comandată după două programe principale: postprandial și interprandial, la care se adaugă programul emetic. Inervația este asigurată de sistemul nervos vegetativ (SNV) și de fibre senzitive ale nervilor rahidieni și cranieni. Sunt trei componente ale inervației vegetative: simpatică, parasimpatică și enterică (intrinsecă).

Tractul gastro-intestinal posedă:

- mecanoreceptori pentru gradul de întindere a peretelui și mișcarea conținutului luminal pe suprafața mucoasei;
- chemoreceptori pentru osmolaritate, pH și glucoză;
- termoreceptori.

Neuronii senzitivi au corpul celular situat în ganglionii spinali, nodoși ai vagului (aferențe pentru SNC) și enterici (circuite locale și aferențe către ganglionii paravertebrali și SNC).

Interneuronii, extrem de numeroși, realizează diverse tipuri de sinapse, în scopul controlului integrativ. Motoneuronii acționează direct asupra celulelor efectoare, excitator sau inhibitor, după neurotransmitătorii eliberați.

Activitatea reflexă se bazează pe circuite stabile formate din neuroni senzitiv și motor și interneuroni; un stimul anume determină același răspuns (de exemplu, distensia determină contracție în amonte și relaxare în aval).

Programele motorii sunt aplicate asupra motoneuronilor de către circuite generatoare de forme de activitate complexe, ciclice, stereotipe (de exemplu, ciclurile de motilitate intestinală postprandială). Comenzile SNC se distribuie în special pe cale vagală, dar nu direct motoneuronilor, ci blocurilor integrate ale sistemului enteric.

Sistemul nervos enteric. Este o rețea neuronală formată din ganglioni situați în peretele tubului digestiv, tracturi primare interganglionare (fibre nemielinizate, diametru $\sim 0,5 \mu m$; tip C) și proiecții

secundare și terțiare către efectori. Se mai numește și „micul creier intestinal”. Acest sistem enteric conține aproximativ 10^8 neuroni (aproape la fel de mulți neuroni ca în măduva spinării). El funcționează ca un sistem integrativ independent, ce cuprinde neuroni senzitivi, interneuroni și neuroni motori. Ganglionii și tracturile interganglionare se dispun în două plexuri interconectate, continue circular și longitudinal: mienteric (Auerbach; rețea bidimensională între straturile musculare longitudinal și circular; conține majoritatea motoneuronilor pentru musculatura netedă) și submucos (Meissner; similar structural, dar cu ganglioni mai mici; mai dezvoltat în intestinul subțire, conține motoneuroni pentru cripte și vili) (fig. 9.38). Morfologic, neuronii ganglionari enterici din ambele plexuri sunt de trei tipuri:

– Dogiel I: prezintă numeroase dendrite scurte butonate și un axon ce participă la realizarea fie a tracturilor interganglionare (sunt interneuroni; mediatorul chimic este 5-HT), fie se proiectează spre stratul muscular circular (sunt motoneuroni; mediatorii chimici fiind: VIP – inhibitor muscular; SP și ACh – excitator muscular) sau la nivelul mucoasei (mediatorii chimici: VIP și ACh – secretomotor).

– Dogiel II: sunt prelungiri polimorfe scurte (strict intraganglionare; mediatorul chimic este SP) și lungi, transganglionare, multidirecționale.

– Dogiel III: similar cu Dogiel-II, dar sunt prelungiri mai numeroase și mai scurte; fac sinapse în același ganglion sau în cei vecini.

Juncțiunea neuro-efectoare: neurotransmițătorii sunt eliberați din varicozitățile de pe traiecul terminajilor nervoase și difuzează pe distanțe relativ mari, până la receptori postsinaptici; un număr mic de neuroni motori influențează un număr mare de celule efectoare. Depolarizarea/hiperpolarizarea membranelor produsă de un neurotransmițător excitator/inhibitor se numește potențial joncțional excitator/inhibitor (EJP/IJP). Depolarizarea crește probabilitatea de deschidere a canalelor de calciu de tip L și poate atinge pragul pentru declanșarea unui potențial de acțiune (PA). Creșterea calciului citosolic necesară pentru contracție/secreție se poate realiza și prin eliberare din reticulul endoplasmatic.

Inhibiția presinaptică în sistemul nervos enteric este prezentă în sinapsele excitatoare rapide și lente precum și în joncțiunile neuro-efectoare. Se poate realiza prin sinapsă axo-axonală sau autoinhibiție sau de către mediatori din surse non-neuronale. Propagarea activității în lungul tubului digestiv este controlată prin mecanisme de poartă (care determină direcția, distanța, viteza de propagare): excitabilitatea membranei corpului neuronal (poarta somală) și inhibiția presinaptică.

Principalele substanțe neuromodulatoare ale sistemului nervos enteric sunt menționate în tabelul 9.VII.

TABELUL 9.VII

Substanțe neuromodulatoare ale sistemului nervos enteric

Plex mienteric (Auerbach)	Plex submucos (Meissner)
Acetilcolinesterază	Dinorfină
Calcium-binding protein	Galanină
Colecistokinină	VIP
Dinorfină	Colecistokinină
Enkefalină	Substanța P
Monoaminoxidază	Neuropeptid Y
Neuropeptid Y	ATP
Oxid nitric	GABA
Somatostatin	Galanină
Substanța P	Serotonină
VIP	

Rolurile funcționale ale neurotransmițătorilor și neuromediatorilor eliberați la nivelul sistemului enteric:

1. **Acetilcolina:** excitator principal pentru mușchi, epiteliu intestinal, celule parietale, celule endocrine intestinale.

2. **ATP:** contribuie la transmiterea de la nivelul motoneuronilor musculari inhibitori.

3. **GABA:** prezent în diferite tipuri de neuroni, în funcție de regiune; rol necunoscut.

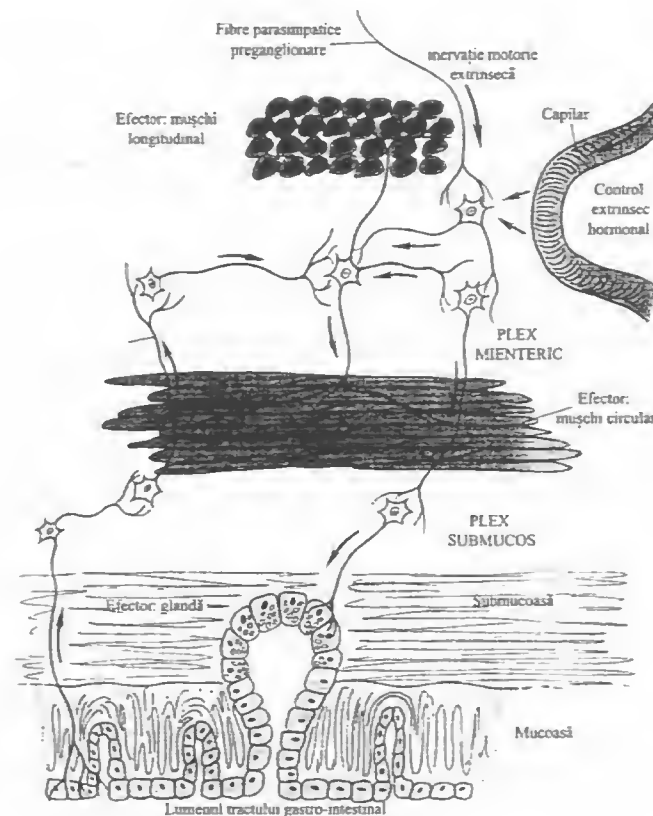


Fig. 9.38. Sistemul nervos enteric.

4. **Colecistokinina:** prezentă la nivelul secretomotoneuronilor, interneuronilor; poate contribui la transmiterea excitatorie.

5. **Dinorfină:** prezentă la nivelul secretomotoneuronilor, interneuronilor și motoneuronilor; nu este un transmițător primar.

6. **Enkefalină:** prezentă la nivelul interneuronilor și al motoneuronilor musculari; rol necunoscut.

7. **Galanina:** prezentă la nivelul secretomotoneuronilor și al neuronilor inhibitori; are rol necunoscut.

8. **Neuropeptidul Y:** prezent la nivelul secretomotoneuronilor; inhibă secreția de apă și electroliți.

9. *Oxidul nitric*: este cotransmițător a motoneuronilor musculari inhibitori enterici; acționează ca mediator al sinapselor neuro-neuronale.

10. *Noradrenalina*: inhibă motilitatea regiunilor non-sfincteriene; contractă musculatura sfincteriană; inhibă reflexele secretomotorii; acționează ca vasoconstrictor al arteriolelor enterice.

11. *Serotonina*: participă la transmiterea neuro-neuronală excitatorie.

12. *Somatostatina*: nu s-a stabilit încă rolul său la nivelul sistemului enteric.

Inervația extrinsecă. Este necesar controlul micului computer local de către cel central, SNC, cu memorie mare, date homeostatice multiple și actuale și posibilități net superioare de integrare, spre binele întregului organism, dar, unenri, cu efect intestinal negativ, ca, de exemplu, în stările emoționale.

Fibrele eferente parasimpatice au originea în bulb, în nucleul dorsal motor al vagului. Fibrele aferente vagale de la tractul gastro-intestinal fac sinapsă în nucleul tractului solitar cu neuroni ce proiectează în nucleul motor amintit situat în apropiere. Acest circuit formează arcul reflex vago-vagal. Comenzile vagale pot iniția procesele digestive (secreție salivară, gastrică și intestinală; relaxare gastrică), anticipând ingestia (miros, văz, imaginație). Comenzile simpatice au efect general inhibitor (reducerea secreției, motilității, debitului sanguin, cu contracția sfincterelor), mediat de noradrenalină (eliberată de fibrele postganglionare, axoni ai neuronilor din ganglionii paravertebrali), prin acțiune pe adrenoceptori α , (scade eliberarea de neurotransmițători excitatori). În afara fibrelor simpatice preganglionare, neuronii din ganglionii paravertebrali primesc aferențe de la mecanoreceptorii gastro-intestinali (mediație N-colinergică; reflexe entero-enterice inhibitorii; reducerea motilității la distanță de o zonă suprastinsă).

9.2.6. FENOMENELE CHIMICE ALE ABSORBȚIEI

Digestia principalelor trofine alimentare, proteine, lipide, glucide, se realizează în cadrul proceselor chimice hidrolitice, asigurate prin participarea a numeroase enzime digestive. Unele din acestea se găsesc în secreția salivară, în cea gastrică și a pancreasului exocrin, în timp ce altele sunt conținute în membrana luminală și citoplasma celulelor epiteliale ale intestinului subțire. Acțiunea enzimelor digestive este favorizată de o serie de activatori, cum sunt acidul clorhidric din sucul gastric și bila, produs de secreția hepatică.

Scindate chimic până la etapa finală de elemente simple (mono- și dizaharide, acizi grași, glicerol și aminoacizi), acestea, împreună cu vitaminele, mineralele și apa trec apoi prin mucoasa intestinului subțire în cadrul fenomenului de absorbție și sunt transportate în circulația generală sanguină și limfatică spre țesuturi, unde vor fi metabolizate.

9.2.6.1. Digestia și absorbția glucidelor

Digestia glucidelor. Alimentele ingerate de om în mod curent conțin monozaharide (glucoză și fructoză), dizaharide (maltoză, lactoză și zaharoză) și mai ales polizaharide de origine animală (glicogen), cu lanțuri bogat ramificate, și polizaharide de origine vegetală (amidon), cu lanțuri liniare.

Digestia polizaharidelor începe în cazul amidonului în cavitatea bucală. Ptiolina, o alfa-amilază salivară, atacă legăturile glicozidice ale amidonului preparat prin coacere sau fierbere, descompunându-l prin faze intermediare la dizaharide (maltoză). Cmpușii intermediari prezintă treptat o vâscozitate din ce în ce mai mică și o tinctorialitate diferită la iod; dacă inițial amidonul devine albastru în prezența iodului iodurat (soluție Lugol), amilodextrina devine violetă, eritrodextrina roșie, acrodextrina incoloră, aceasta din urmă fiind singura ce prezintă ca ultimă fază pozitivitatea la reacția de reducere. Se pare că acțiunea enzimatică cuprinde o sumare de activități fizico-chimice, fiecare adusă de o altă enzimă: una lichefiantă, cu rolul de a solubiliza amidonul, una dextrinizantă și alta zaharifiantă.

Condițiile ideale ale proprietăților catalitice sunt reprezentate în primul rând de pH (între 6,7–6,8 fiind idealul), fapt indicat de oprirea activității enzimatică în stomac după amestecul cu sucul gastric (pH 1,3–3,2), la circa 30 de minute de la pătrunderea în stomac.

Mici cantități de maltoză sunt scindate de o maltază salivară în două molecule de glucoză, încă de la nivelul cavității bucale (gustul dulce al pâinii mestecate mult).

Digestia glucidelor este reluată la nivelul duodenului și intestinului subțire, unde bogăția enzimatică a sucurilor de la acest nivel asigură dextrinarea tuturor cmpușilor cu lanțuri glicozidice.

Amilaza pancreatică, deși este tot o alfa-amilază, scindează legăturile glicozidice (amilpectinele), fiind cu mult mai activă decât amilaza salivară, acțiunea ei bazându-se pe o mare mobilitate de dextrinificare și zaharificare a polizaharidelor.

Legăturile ramificate glicozidice și chiar cele neramificate, până la npt molecule de monozaharide, sunt hidrolizate sub acțiunea enzimelor de origine intestinală, parte în lumen, parte în pereții vilari intestinali sau chiar în sânge. Astfel, izomaltazele, patru-cinci la număr, hidrolizează dextrinele în glucoză, lactazele (două la număr) hidrolizează lactoza în galactoză și glucoză, iar cele două zaharaze hidrolizează zaharoza în glucoză și fructoză (fig. 9.39).

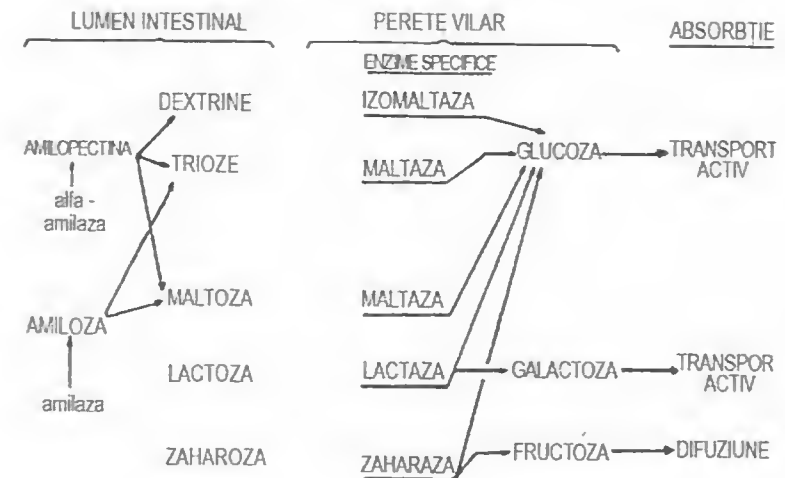


Fig. 9.39. Digestia și absorbția glucidelor.

Absența din urină a maltozei injectate intravenos indică existența și a unei maltaze plasmatice, sugerând posibilitatea ca maltoza, ca dizaharid, să fie direct resorbabilă.

Tulburările de sinteză a acestor enzime vor duce la alterări ale tranzitului intestinal (accelerarea cu scăderea absorbției digestive a glucidelor).

Celuloza la om nu este atacată enzimatic; excepție face intestinul gros unde, sub acțiunea bacilului celulosal, ea este scindată până la glucoză în cantități mici. Prezența ei nedigerată stimulează peristaltismul.

Absorbția glucidelor. Descompuse în monozaharide, glucidele se absorb. Esențial pentru absorbția glucidelor este faptul că toate hexozele sunt transportate prin epitelul intestinal înainte de ajungerea chimului în segmentul terminal al ileonului. Transportul maxim al glucozei este de 120 g/h (fig. 9.40).

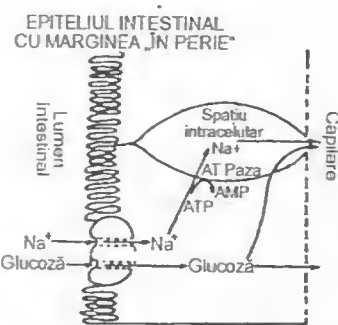


Fig. 9.40. Transportul glucozei prin epiteliul intestinal.

de tip „sinport”), care se găsește în marginea „în perie” a celulelor epiteliale. Această proteină nu poate transporta glucoza în absența Na^+ , ea fiind prevăzută cu situsuri receptoriale pentru ambele substanțe, transportul neputându-se efectua decât în condițiile ocupării simultane a celor două locuri de fixare.

Creșterea concentrației intracelulare de glucoză determină apoi trecerea acesteia în spațiul extracelular și capilare prin difuziune facilitată la nivelul membranei bazale și laterale a enterocitului, în timp ca Na^+ este expulzat activ cu energie preluată din hidroliza ATP în prezența unei ATPaze, la nivelul aceluiași zone membranare.

Un mecanism similar cotransportor se presupune a avea loc și în cazul transportului celor mai mulți aminoacizi („carrier-drag”). Există și posibilitatea transportului glucozei prin fenomenul de „solvent-drag”, mecanism ce antrenează trecerea transmembranară a particulelor solvite odată cu mișcarea moleculară de solvent.

Galactoza se absoarbe la fel ca glucoza, în timp ce fructoza utilizează alte proteine „carrier”, independent de Na^+ sau glucoză, transportul realizându-se însă și prin difuziune facilitată. Pentozele sunt absorbite prin difuziune simplă.

După traversarea barierei intestinale, monozaharidele sunt preluate de sângele venei porte și transportate la ficat, unde sunt depuse sub formă de polizaharide (glicogen) în cantitate echivalentă cu aproximativ 150 g glucoză (ca masă metabolică relativ constantă de rezervă a ficatului). Atât depozitarea, cât și întrebuințarea sunt dependente de hormoni (insulină, glucagon, adrenalina), spre deosebire de absorbție, digestie și reabsorbția renală, care se realizează independent de acțiunea hormonilor.

9.2.6.2. Digestia și absorbția proteinelor

Digestia proteinelor. Transformarea catalitică a compușilor proteici începe în stomac, unde o parte din proteinele alimentare sunt scindate în compuși polipeptidici sub acțiunea pepsinei.

Aparținând endopeptidazelor, pepsina provenită din pepsinogen hidrolizează proteine de origine animală sau vegetală la nivelul pozițiilor în care fenilalanina sau tirozina se leagă de un alt aminoacid; după solubilizare și transformare în acidalbumine, proteinele sunt scindate în albumoze și peptone (polipeptidele cu lanț mai scurt). În soluțiile slab acide, pepsinogenul este catalizat la pepsină + inhibitor, compuși ce devin independenți activi la un pH inferior lui 5,4; inhibitorul este inactivat rapid sub pH 3,4–4, proces reversibil. Acțiunea enzimatică a pepsinei încetează în mediul bazic intestinal, înlocuită fiind de acțiunea energetică a tripsinei, chimotripsinei, carboxipeptidazei, care hidrolizează proteinele până la stadiul de polipeptizi scurți și chiar de dipeptide.

Comparându-se viteza de absorbție a glucozei cu cea a fructozei (sub 1/2 din cea a glucozei) și a pentozelor (mult mai mică), se constată că în absorbția glucozei intervine un mecanism activ secundar, consumator de energie, dependent de mecanismele fosforilante și de ionul de Na^+ .

În mod normal, concentrația intracelulară în Na^+ a celulelor epiteliale intestinale este scăzută, în timp ce concentrația intraluminală este mai crescută. Na^+ se deplasează din lumenul intestinal în celulă, conform gradientului de concentrație și electric (transport pasiv), în timp ce mișcarea glucozei sau galactozei, care se efectuează simultan cu cea a Na^+ , are loc împotriva gradientului de concentrație, prin mecanism activ (transport activ secundar).

Energia necesară traversării peretelui intestinal de către glucoză este dată de forța diferenței de concentrație a Na^+ , de o parte și de alta a membranei enterocitare.

Intrarea Na^+ și a glucozei în celulă intestinală se face prin folosirea în comun a aceleiași proteine „carrier” (cotransportare

Structura, precum și modul de formare și acțiune a acestor enzime au fost descrise la compoziția sucului pancreatic.

Lanțurile scurte peptidice, rămase nehidrolizate, sunt scindate în continuare de peptidazele intestinale grupate sub numele de erepsină. Ineficace asupra lanțurilor complexe proteice, acest amestec proteazic dedublează polipeptidele scurte.

În final, datorită acțiunii combinate a enzimelor proteolitice, proteinele sunt hidrolizate terminal la aminoacizi.

În afara acestui proces general de hidroliză proteică, atât suc pancreatic, cât și cel intestinal oferă o gamă complexă de enzime cu acțiune specifică. Leucin aminopeptidaza și protaminaza de origine pancreatică eliberează leucina și, respectiv, arginina din lanțurile polipeptidice catalizate deja de tripsină. O parte din enzimele care scindează acizii nucleici succesiv, în etape, se găsește în suc pancreatic, în timp ce altă parte este localizată pe suprafața luminală a celulelor mucoasei intestinale. Astfel, nucleazele pancreatice și intestinale hidrolizează acizii nucleici desprinși din nucleoproteine de tripsină, degradându-i în nucleotide. La rândul lor, nucleotidazele continuă degradarea până la nucleozid și acid fosforic, iar nucleozidazele aduc nucleozidul la pentoză și baze purinice sau pirimidinice. Faptul că activitățile peptidazice ale celulelor epiteliale intestinale, atât cele din marginea „în perie”, cât și cele intracitoplasmice sunt crescute după rezecția parțială a ileonului și alterate în inaniție pare să constituie dovada existenței unei reglări de tip homeostatic a activității enzimactice enterocitare.

O categorie specială de proteine o reprezintă cele solvite în soluții hidrosaline (laptele, sângele etc.). Ingerarea proteinelor solubile este posibilă doar prin transformarea lor în complexe insolubile. În acest sens, pentru lapte, la adult, este importantă mai ales chimotripsina, în timp ce pentru sânge, tripsina. La sugar, unde aceste enzime se găsesc în cantitate mai modestă, pe de o parte, iar, pe de altă parte, cantitatea de lapte este relativ mare față de posibilitățile gastrice de înmagazinare, există labfermentul, cheagul sau presura, enzimă cu acțiune coagulantă a laptelui încă din stomac. Cazeinogenul solubil este transformat, prin faze intermediare, în prezența ionului de Ca^{2+} , în cazeinat, sub acțiunea catalitică a labfermentului, activ doar la pH acid (4,5–5,5). Coagulul format și rămas în stomac, floconos, din laptele matern, și în bloc, din laptele de vacă, cuprinde particule grase, separându-se de lactoser, rapid trecut în intestin. În acest fel, proteinele laptelui sunt catalizate la sugar încă în stomac, oferindu-se, prin îndepărtarea lactoserului, posibilitatea ingestiei unei cantități mari de lapte.

La adult, aproximativ 50% din proteinele digerare provin din alimente, 25% din proteinele sucurilor digestive, iar restul de 25% din celule descuamate ale mucoasei.

Absorbția aminoacizilor și derivaților nucleotidici. După un prânz bogat în proteine, aminoacidemia crește rapid și intens în vena portă, ca rezultat al procesului de absorbție intestinală, ce are loc cu viteză crescută în duoden și jejun și mai lent în ileon.

Absorbția aminoacizilor cunoaște patru sisteme separate de transport prin epiteliul mucoasei intestinale, și anume: transportul aminoacizilor neutri, aminoacizilor bazici, transportul prolina, hidroxiprolina și glicinei și, în sfârșit, transportul aminoacizilor glutamic și aspartic. Există, de asemenea, un sistem de transport diferit pentru di- și tripeptide.

Absorbția aminoacizilor levogiri predomină, căci este cuplată cu transportul de Na^+ (analog glucozei), fiind facilitată de concentrațiile înalte ale acestui ion la suprafața celulelor epiteliale intestinale.

Transportul aminoacizilor dextrogiri, ca și al celor produși prin hidroliza intracelulară a di- și tripeptidelor acumulate în celulele mucoasei intestinale se realizează aparent prin difuziune pasivă în sângele portal. Doar foarte puține peptide sunt cunoscute ca având capacitatea de a pătrunde ca atare în circulația portală, cum sunt cele provenite din gelatină, în structura căreia intră prolina și hidroxiprolina, sau cele din alimentele ce conțin carnozina și anserină.

Bazele purinice și pirimidinice rezultate din hidroliza acizilor nucleici sunt absorbite prin transport activ. Aminoacizii din vena portă sunt reținuți în deosebi de ficat, dar și de alte țesuturi, fiind utilizați în sintezele proteice. În ultimii ani a fost descrisă ca semnificativă și calea limfatică a absorbției aminoacizilor, cale care, șuntând ficatul, asigură aminoacidemia plasmatică și, deci, continuă aprovizionarea celulară cu elemente necesare sintezelor structurale (plastice) și funcționale. La sugari, absorbția este mult mai puțin discriminativă, datorită unei puternice pinocitoze la nivelul vilozităților, ceea ce permite transportul transmural al anticorpilor oferiți de mamă prin lapte; acest aspect pare să fie incriminat și în alergizările

posibile la alimentarea proteică timpurie (de exemplu, ouă). Odată cu maturizarea tubului digestiv, pinocitoza mucoasei intestinale diminuează, motiv pentru care crește toleranța la alimentația proteică. Absorbția proteinelor antigenice, în particular a proteinelor microbiene și virale, are loc în celulele criptelor mucoasei intestinale și în celulele „M”, focuri specializate ce se alătură țesutului limfoid intestinal (plăcile Payer), în care este trecut acest tip de proteine.

Din cantitatea totală a proteinelor ingerate, numai 2–5% scapă digestiei și absorbției. Aceste proteine, la rândul lor, constituie aproximativ 15% din proteinele ajunse în colon, la care se adaugă cele din plasma extravazată în lumenul intestinal, ca și cele provenite din celulele descumate.

Proteinele din intestinul gros sunt descompuse prin putrefacție bacteriană, iar cele prezente în materiile fecale provin din celulele mucoasei segmentului terminal al colonului, precum și din bacterii.

9.2.6.3. Digestia și absorbția lipidelor

Digestia lipidelor. Acțiunea enzimatică asupra lipidelor începe la nivelul stomacului sub influența lipazei gastrice, dar efectul acestuia este minor și limitat doar la grăsimile emulsionate prin pregătirea alimentului (frișcă, maioneză, lapte).

Lipaza pancreatică, esteraza cea mai activă din tubul digestiv, separă lipidele neutre în acizi grași și glicerol. În un pH optim de 7–8, ionii de Ca^{2+} și Mg^{2+} , alături de cloruri, carbonați și bicarbonați de Na^+ și K^+ fiind activatori.

Caracteristica principală a acestei enzime este reprezentată de marea sa putere hidrolitică, exprimată chiar și asupra trigliceridelor cu lanț lung, insolubil în apă. Reacția are loc în etape, detașând succesiv trei legături lipidice. Enzima hidrolizează legăturile 1 și 3 ale trigliceridelor relativ ușor, în timp ce acțiunea pe legătura 2 are o rată încetinită. Rezultatul final al reacției de hidroliză este reprezentat de starea de echilibru dintre 80% acizi grași liberi, 10% fixați în di- și monogliceride, și 10% rămași neatacați în trigliceride. Asupra compușilor fosfolipidici și sterani acționează enzime specifice, de tipul lecitinazei, care descompune fosfoaminolipidele în acizi grași și glicerofosfat chimic hidrolizat. Emulsionarea lipidelor în intestinul supjire (proces fizic de scădere a tensiunii superficiale a acestora) apare prin acțiunea de detergent a sărurilor biliare, lecitinei și monogliceridelor.

Sărurile biliare singure sunt agenți slab emulsionanți, dar în prezența fosfolipidelor și a monogliceridelor se formează miceli. Acestea sunt agregate sferice de 3–10 μm diametru, ce asigură solubilitatea gliceridelor, suprafață imensă oferită enzimelor hidrolizante prin sumarea suprafeței particulelor și transportul prin celulele mucoasei. Lipidele conținute în miceli sunt reprezentate, în general, de acizi grași, monogliceride și colesterol.

Cea mai mare parte a colesterolului alimentar se găsește sub formă esterificată. Asupra acestuia acționează colesterol esteraza pancreatică, eliberând colesterolul liber și acidul gras. Miceliile se deplasează în sensul gradientului de concentrație prin stratul de apă staționar din apropiere a marginii „în perie” a celulelor mucoase (fig. 9.41).

Aici, lipidele se desprind de miceli și realizează o soluție apoasă saturată cu lipide, în contact intim cu epiteliul absorbant intestinal, prin care se asigură etapa următoare, cea de transport prin celulele mucoase. Acțiunea emulsionantă a sărurilor biliare (SB) se realizează nu numai prin reducerea tensiunii superficiale a picăturilor de lipide, ci și prin încărcătura lor electronegativă ce favorizează pătrunderea taurocolatului și glicocolatului în acizi grași (AG), înlesnind absorbția acestora (schimbarea sarcinii electrice crește solubilitatea lor, grăbind trecerea prin mucoasa intestinală).

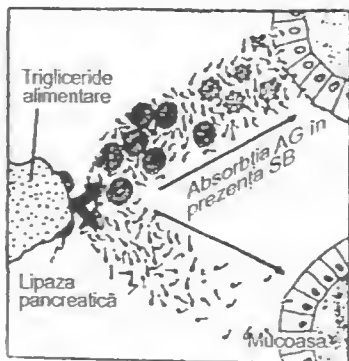


Fig. 9.41. Digestia și absorbția lipidelor

Spre deosebire de mucoasa ileală, rata captării sărurilor biliare prin mucoasa jejunală este scăzută, acestea difuzând înapoi spre lumenul intestinal unde refac noi miceli.

Alterări ale secreției exocrine pancreatice, ca și scăderea pH-ului duodenal duc la steatoree (eliminarea în materiile fecale de lipide neprelucrate chimic) prin insuficiența sau, respectiv, inhibarea lipazei pancreatice.

Absorbția lipidelor. Din grăsimile ingerate la un prânz moderat lipidic, 95% se absorb, iar 5% se elimină prin fecale, nedigerate; această cantitate mică eliminată este sporită cu lipidele din celulele descumate și de lipidele din bacterii. Absorbția lipidelor are loc în cea mai mare parte în segmentul jejunal, dar o cantitate apreciabilă se poate absorbi și în ileon.

Monogliceridele, acizii grași și colesterolul din miceli intră în celulele mucoasei intestinale prin transport pasiv. Pătrunse în celula vilozității intestinale, monogliceridele sunt descompuse în acizi grași și glicerol.

Acizii grași sosii ca atare din lumenul intestinal sau cei rezultați din scindarea intracelulară a monogliceridelor vor fi trecuți în circulația generală în mod diferit, funcție de lungimea lanțului de atomi de carbon ce intră în compunerea acestora. Astfel, acizii grași cu până la 12 atomi de carbon vor fi transportați rapid spre sângele portal sub formă liberă, cale pe care vor ajunge în continuare la ficat, unde vor fi metabolizați. Acizii grași cu mai mult de 12 atomi de carbon sunt întrebuințați la resinteza intracelulară de trigliceride, în care caz sunt reesterificați în reticulul endoplasmatic și transportați pe cale limfatică. Majoritatea grăsimilor din alimentație conțin acizi grași cu 16–18 atomi de carbon, ceea ce are ca urmare predominarea absorbției de lipide pe cale limfatică. Monogliceridele și digliceridele scăpate hidrolizei intraluminală sau intracitoplasmatic vor fi utilizate la sinteza intracelulară de lipide. O mică parte din trigliceridele ce se află în lumenul intestinal poate trece în interiorul celulelor mucoasei intestinale chiar sub această formă, prin mecanismul de pinocitoză.

Transportul intracelular al lipidelor. Trecerea grăsimilor și intensă activitate intracelulară postprandială sunt reprezentate printr-o serie de aspecte microscopice caracteristice ce au loc în epiteliul intestinal.

Astfel, pe măsura absorbției, celulele apicale ale vârfurilor vilozităților conțin mai multă grăsime decât restul celulelor, grăsimi ce rămân un timp localizate în zona supranucleară. Într-o fază ulterioară, mici particule distincte de grăsime apar în reticulul endoplasmatic, iar microzomi care provin din reticul conțin enzime ce resintetizează trigliceridele, astfel că picăturile de grăsime depozitate în reticul sunt probabil lipide nou sintetizate de către acestea.

În plus, în citoplasmă se găsește particule neregulate de grăsime (provenite probabil din reticulul endoplasmatic), ce sunt înconjurate de un înveliș membranos care conține fosfolipide. Aceste picături de grăsime se detașează și se reunesc sub membrana bazală a epiteliului.

Sinteza intracelulară de lipide. Așa după cum s-a arătat anterior, acizii grași cu lanț lung, mono- și digliceridele nehidrolizate sunt resintetizate în trigliceride și fosfolipide înainte de a părăsi celulele enterocitare pentru a pătrunde în limbă. Odată absorbite în enterocit, monogliceridele, scăpate acțiunii hidrolitice intestinale, sunt parțial scindate în acizi grași liberi și glicerol. Lipaza intracelulară ce operează această hidroliză acționează și asupra digliceridelor.

Procesul de resintetizare începe odată cu ajungerea acizilor grași la nivelul reticulului endoplasmatic neted, unde sunt activați prin cuplarea cu coenzima A. Cuplarea necesită consum de energie preluată din ATP, reacție catalizată de o kinază în prezența ionului de magneziu. Se formează complexul acid gras-CoA (AG-CoA). Acesta reacționează cu glicerolul (via alfa-glicerofosfat), provenit din metabolismul intermediar al glucozei celei intestinale, formând un monoglicerid. De altfel, în perioadele alimentare, când există o disponibilitate de glucoză, rata sintezei de trigliceride crește.

Glicerina rezultată din hidroliza lipidelor este puțin utilizată în acest proces. Ea poate participa în reacție cu condiția fosforilării prealabile în prezența glicerokinazei, enzimă de care mucoasa intestinală dispune în cantități mici. Glicerolul nefosforilat este transportat rapid prin circulația portală la ficat, unde participarea sa la procesul de sinteză a lipidelor este importantă. O altă parte din glicerolul eliberat prin hidroliza trigliceridelor în cavitatea intestinală este oxidată de către CO_2 în celulele mucoasei sau va fi transformată în glicogen.

Monogliceridul sintetizat în celula mucoasei intestinale reacționează cu mono- sau digliceridele intracitoplasmatic, rezultând trigliceride (fig. 9.42).

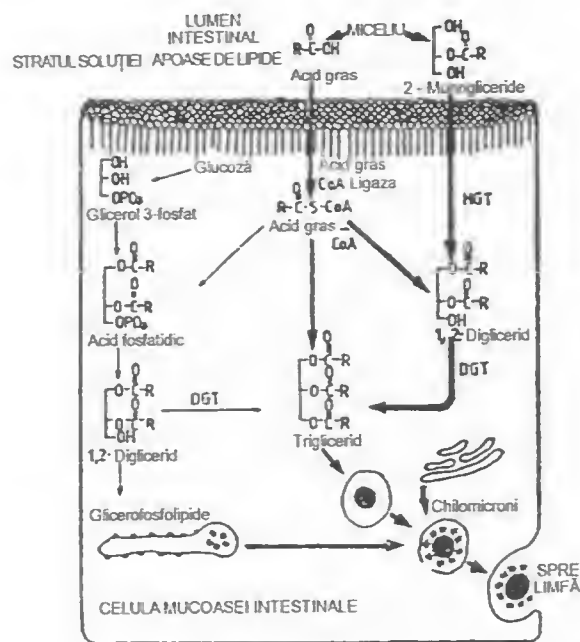


Fig. 9.42. Absorbția și sinteza de lipide la nivelul celulelor mucoasei intestinale subțire. MGT, mono-glicerid aciltransferaza. DGT, diacilglicerol transferaza.

Acetil CoA poate, de asemenea, reacționa cu alfa-glicerofosfatul pentru a forma acidul lizofosfatidic, care, la rândul său, se poate combina cu citidina pentru a deveni fosfolipid sau poate pierde fosfatul și deveni un diglicerid. Picăturile de trigliceride nou-formate sunt trecute apoi în reticulul endoplasmatic rugos și aparatul Golgi, unde sunt învelite cu beta-lipoproteine, colesterol și fosfolipide, realizând particule numite chilomicroni, cu un diametru de 0,1–0,5 μ m.

Chilomicronii astfel formați vor fi eliminați prin exocitoză la nivelul zonei laterale și bazale a celulelor, în spațiile interstițiale și, de aici, în vasele limfatice. Sărurile biliare conjugate (taurocolatul și glicocolatul) stimulează esterificarea intracelulară a acizilor grași.

În cursul absorbției grăsimilor, fosfolipidele din mucoasa intestinală traversează activ ciclul lor metabolic de sinteză, astfel încât concentrația acestora rămâne constantă, în pofida consumului intens din procesul de formare a chilomicronilor.

După ingestia de 32 P simultan cu un triglicerid, activitatea specifică a fosfolipidelor din mucoasă crește rapid. Maximum de concentrație a 32 P în fosfolipide este atins la patru ore după ingestie, dar diferiții acizi grași sunt încorporați în fosfolipide și trigliceride în proporții diferite. Acidul stearic pătrunde în fosfolipide mai rapid decât acizii palmitic și miristic.

Nu este necesar ca acizii să fie încorporați în fosfolipide ca o etapă intermediară a absorbției.

Sinteza intracelulară de fosfolipide face parte din procesele prin care picăturile de grăsime se înconjură de înveliș.

Absorbția colesterolului. Colesterolul, mai ales cel de origine animală, se absoarbe în prezența bilei, acizilor grași și a sucului pancreatic, în cantitate mare; forma de absorbție este de chilomicroni, pe cale limfatică. Absorbția colesterolului diminuează mult la o alimentație cu grăsimi vegetale (ulei de soia), pe baza competitivității sale cu transportul acizilor grași nesaturați.

Colesterolul este absorbit de subiectul uman adult cu un debit de aproximativ 10 ml/kg/24 de ore. La o ingestie de 10–20 de ouă, absorbția de colesterol se dublează.

Studii cu traser radioactiv 14 C au arătat că limita superioară a concentrației colesterolului în circulația limfatică, în caz de ingerare a unei mari cantități din acesta, apare la om la nouă ore după ingestie, în timp ce pic-ul de absorbție a grăsimilor în enterocit este pus în evidență cu trei ore mai devreme (absorbție rapidă cu eliminare lentă în limfă).

Colesterolul din cavitatea intestinală provine din două surse, în afara celei alimentare: secreția biliară, ce aduce la un subiect adult 1–2 g/zi, și colesicrolul prezent în celulele mucoase intestinale descuamate (în jur de 0,25–0,40 g/zi).

Colesterolul din intestin este amestecat cu săruri biliare, grăsimi și colesterol esterizat prezentă în sucul pancreatic. Cea mai mare parte din colesterolul esterificat este hidrolizat înainte de a fi încorporată în miceli.

Capacitatea diferită a sterolilor de a forma miceli explică probabil selectivitatea lor de absorbție; de exemplu, ergosterolul, care este slab absorbit, nu formează miceli la fel de rapid cum face colesterolul. În absența bilei nu se produce absorbția de colesterol. Absorbția simultană de grăsimi exogene nu este neapărat necesară pentru absorbția colesterolului.

Astfel, colesterolul ingerat într-un regim alimentar fără grăsimi poate fi absorbit, probabil, pentru că grăsimile endogene, ce sunt suficiente pentru formarea miceliilor, se găsesc permanent prezente în conținutul intestinal.

Așa cum s-a arătat, mare parte sau chiar totalitatea colesterolului esterificat este hidrolizat de colesicrol esteraza pancreatică înainte de a fi absorbită. Cu cât esterii colesterolului ingerat sunt hidrolizați mai rapid de către esterază, cu atât ei sunt absorbiți mai rapid.

Esterii de colesterol complet rezistenți la hidroliză sunt absorbiți.

Odată absorbit în celulele mucoase ale duodenului și jejunului superior, colesterolul se amestecă cu fondul comun de colesterol al mucoasei acestora.

Cu 14 C s-a constatat că el rămâne decelabil în fondul comun de colesterol al mucoasei timp de 48–72 de ore, iar declinul activității specifice a fondului comun de colesterol la șobolanul nemâncat arată un ciclu metabolic cu durată de 24 de ore. La subiectul *à jeun*, ciclul metabolic rezultă din transferul neîntrerupt de colesterol intracelular în limfă, din înlocuirea sa continuă prin neosinteză în celulele mucoase și prin absorbția colesterolului din bilă. În fiecare zi, 1–3 g de colesterol de toate proveniențele sunt conduse din tractul intestinal în limfă, iar colesterolul ingerat este diluat în colesterolul circulant.

Cu cât există o fracție mai importantă de colesterol liber, cu atât procesul de esterificare în celule se intensifică, astfel că o cantitate egală sau de 2/3 din colesterolul chilomicronilor limfei este esterificată de acizii grași intracelulari. Absorbția unor steroli ingerați este dependentă de structura lor: cu cât este mai lipoidică, absorbția este mai mare, sau cu cât cantitatea absorbită este mai polarizată și hidrosolubilă, cu atât absorbția este mai redusă. Administrarea de steroli blochează absorbția de colesterol, astfel că în reziduu fecal cantitatea de colesterol eliminat crește, iar cantitatea de colesterol biliar scade.

9.2.6.4. Absorbția vitaminelor

Vitaminele hidrosolubile se absorb ușor, probabil prin pinocitoză, în partea superioară a intestinului subțire, cu excepția vitaminei B₁₂, care se absoarbe preponderent în ileon împreună cu factorul intrinsec. La rândul lor, vitaminele liposolubile sunt dependente de absorbția lipidelor și presupun funcția intactă a pancreasului și bilei.

Carotenul și vitamina K, care sunt liposolubile, pot fi absorbite numai când există bilă în intestin. Absorbția lor, ca și a vitaminei E, este facilitată de absorbția simultană de mici cantități de grăsime, probabil pentru că aceste vitamine sunt dizolvate în miceli.

Vitamina A se absoarbe în lipsa bilei. Absorbția vitaminei D este favorizată de grăsime. Derivații sterolici, testosteronul, cortizonul, acetatul de cortizon și corticosterolul nu sunt transportați în limfă după absorbție, ci pătrund în circulație pe calea sângelui portal.

9.2.6.5. Absorbția apei și a electrolitilor

Aportul exogen de apă este în medie de 2 000 ml/zi, aport obligatoriu, deoarece apa intră în compoziția chimică a mediului de viață al celulelor. Absorbția apei are loc la nivelul intestinului subțire și al colonului, în 24 de ore absorbându-se circa 9 litri de apă, din care aproximativ 7 litri provin din sucurile digestive (salivă, suc gastric, suc pancreatic, bilă, suc intestinal). Din întreaga cantitate de apă care ajunge la nivelul intestinului subțire cea mai mare parte se absoarbe la acest nivel (aproximativ 8,5 litri), iar restul trece prin valvula ileo-cecală în colon, unde se absoarb 800-900 ml apă. Materiile fecale conțin cca 100-200 ml apă (fig. 9.43). Apa difuzează rapid la nivelul enterocitelor, rata de difuzie și sensul în care se realizează acest proces sunt determinate de diferența de osmolaritate între lumenul intestinal și plasmă. Cu alte cuvinte procesul de difuzie a apei la nivelul intestinului subțire depinde de capacitatea mucoasei intestinale de a controla osmolaritatea conținutului intestinal; mecanismele care stau la baza controlului acestui parametru sunt: absorbția de NaCl; influența compușilor osmotici activi din lumenul intestinal și secreția de K^+ și/sau Cl^- și HCO_3^- de către epiteliul intestinal.

Apa traversează pasiv în ambele direcții mucoasa intestinelor subțire și gros în funcție de gradientul osmotic.

Na^+ este transportat pasiv și prin difuziune, înăuntrul sau în afara celulei, în funcție de gradientul de concentrație, dar și activ, în lumenul intestinal, prin pompa ce pare a fi localizată pe pereții laterali și bazali ai celulelor. S-a mai constatat trecerea acestui ion și prin mecanismul „solvent-drag”.

Transportul Na^+ intestinal este cuplat cu cel al glucozei, prezența acestuia favorizând resorbția Na^+ și invers, ceea ce constituie baza fiziologică a tratamentului cu soluții de NaCl și glucoză în pierderile de apă și sodiu. Osmolaritatea conținutului duodenal poate fi hipertonică sau hipotonică, depinzând de alimentele ingerate, dar, în jejun, osmolaritatea chilului intestinal, indiferent de alimentație, este adusă la nivel plasmatic. În felul acesta, absorbția elementelor obligă și apa să treacă spre interstițiu, conservând osmolaritatea intraluminală.

K^+ se secretă în cea mai mare parte prin difuziune. Mișcarea netă a K^+ este proporțională cu gradientul electric dintre sânge și lumenul intestinal. În jejun, diferența de potențial pentru K^+ este de 5 mV (lumenul este negativ față de sânge), în ileon de 25 mV și în colon de 50 mV.

Ca urmare, K^+ va fi din ce în ce mai puternic atras spre segmentele digestive în ordinea enumerată, astfel încât concentrarea sa pe baza difuziunii simple și singulare va fi de 6 mEq/l în jejun, aproximativ 13 mEq/l în ileon și 30 mEq/l în colon. Această distribuție explică de ce scăderea lichidului ileal și a celui colonic în diareele cronice poate duce la hipokaliemie.

Cl^- și HCO_3^- : în ileon și colon Cl^- este resorbit activ în raport de 1:1 la schimb cu HCO_3^- , care tinde să crească alcalinitatea conținutului intestinal.

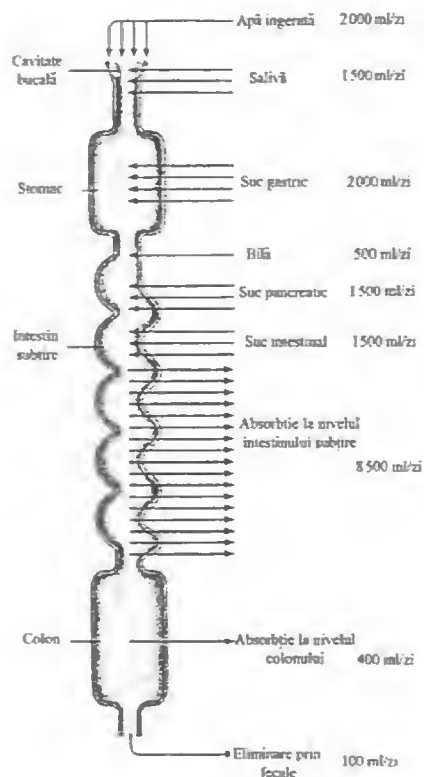


Fig. 9.43. Debitul schimburilor lichidiene prin pereții tubului digestiv; valori zilnice aproximative.

9.2.6.6. Absorbția mineralelor

În mod obișnuit, între 30 și 80% din calciul alimentar solubil (ionic) este absorbit în funcție nu de concentrația sa în lumen, ci de nevoile momentane ale organismului. Transportul activ al calciului în afara lumenului intestinal are loc în segmentul superior al intestinului subțire, unde poate fi absorbit și prin difuziune pasivă.

În favoarea absorbției intervine energetic 1,25 - dihidroxicalciferolul (metabolit al vitaminei D), care induce sinteza proteinei ce leagă calciul în celulele mucoasei.

Rata producerii acestui metabolit este crescută când calciul plasmatic este scăzut și redusă când calciul este crescut.

În acest mod, absorbția Ca este ajustată la necesitățile organismului. Transportul Ca este favorizat și de alte substanțe (lactoza, proteine) și inhibat de fosfați și oxalați din cauză că acești ioni formează săruri insolubile cu Ca.

Absorbția magneziului este și ea dependentă de prezența proteinelor.

Absorbția fierului: din cantitatea totală de Fe ingerat se absoarb 3-5%. Fe alimentar se găsește sub formă trivalentă, iar pentru a fi absorbit el este redus în stomac (în prezența HCl) în Fe bivalent. Acidul ascorbic și alte substanțe reductoare facilitează această conversie. Alt factor modulator este acidul fitic din cereale, care frânează absorbția Fe, întrucât formează compuși insolubili cu acesta (fitați), la fel fosfații și oxalații. Sucul pancreatic inhibă, de asemenea, absorbția fierului.

Fe se absoarbe activ îndeosebi în segmentele duodenal și jejunale ale intestinului (fig. 9.44). Cea mai mare parte din Fe se transformă prin legarea în celulele intestinale de o proteină, apoferitină, formându-se cuplul numit feritină, prezentă în toate țesuturile. Molecula de feritină poate conține 4 000 de atomi de Fe și reprezintă forma principală de depozit al Fe în țesuturi, alături de hemosiderină, o proteină granulară complexă. În plasmă, Fe se află și sub formă legată de beta₂-globulină, numită transferină sau siderofilină.

În organism, Fe se găsește în cantitate de 70% în hemoglobină, 3% în mioglobină și restul în feritină, acesta din urmă în echilibru cu Fe plasmatic.

Pierderile de Fe din organism se datoresc eliminării Fe odată cu descumarea celulelor epiteliale intestinale la sfârșitul ciclului lor de viață și trecerii acestuia în materiile fecale.

În încărcarea cu Fe, depozitarea acestuia crește și absorbția scade, mucoasa având capacitatea de a se proteja față de ingestia crescută de Fe prin scăderea transportului.

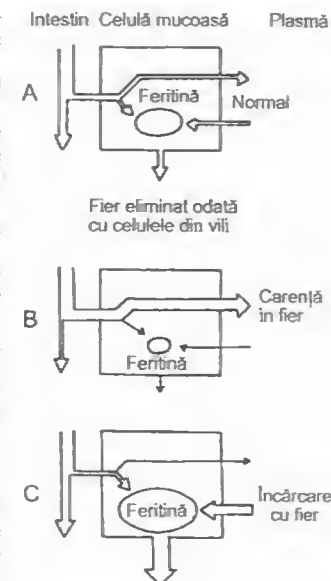


Fig. 9.44. A: Controlul absorbției fierului în celulele mucoasei intestinale. Grosimea săgeților este proporțională cu conținutul în fier al fiecărei căi parcurse. Diametrul ovalului este funcție de cantitatea de feritină depozitată. B: Depozitul de feritină scade în carența de fier. În timp ce cantitatea absorbită în sânge crește. C: Cantitatea de feritină în celulele mucoasei intestinale este crescută în încărcarea cu fier, ceea ce determină absorbția scăzută a fierului.

9.2.6.7. Absorbția sărurilor biliare

În porțiunea superioară a intestinului subțire, sărurile biliare nu sunt absorbite, ele fiind necesare digestiei și absorbției grăsimilor în părțile superioară și mijlocie ale intestinului. În schimb, ele vor fi absorbite în ileonul distal înainte de trecerea chimului în colon.

Absorbția sărurilor biliare se face prin mecanisme active și este mediată de transportori.

După absorbție, sărurile biliare sunt resecretate în bilă de către ficat și returnate în duoden (circuitul entero-hepato-enteric). Ocazional, o parte din sărurile biliare neabsorbite este evacuată în colon, unde poate determina stări diareice datorită efectului iritant pe care aceștia îl au asupra mucoasei (efect de detergent).

9.2.6.8. Absorbția și excreția prin colon

Colonul primește în fiecare zi 400–500 ml de chim din ileon. Lichidul recoltat prin ileostomie este aproximativ izotonic și conține apă, Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , Ca^{2+} . Ionul bicarbonic determină pH-ul alcalin al lichidului din intestinul gros.

Colonul absoarbe un volum net de apă de 300–400 ml/24 de ore, o cantitate cu mulți mai puțin importantă decât cea transportată de către intestinul subțire (8 000 ml/zi), iar prin materiile fecale se elimină 200 ml apă/zi.

Capacitatea maximă de absorbție a colonului este de 2 450 ml în 24 de ore.

Osmolaritatea lichidului rămâne neschimbată la trecerea prin colon, dar există o absorbție activă de Na^+ , având un debit de 0,28 mEq/min, și o absorbție de clor, având un debit de 0,39 mEq/min. Mucoasa secretă în schimb K^+ , cu un debit de 0,031 mEq/min, și bicarbonat, cu un debit de 0,18 mEq/min.

Se constată că toate fluxurile sunt mai importante în partea stângă decât în partea dreaptă a colonului. O cantitate de apă egală cu 0,3% din apa totală corporală este conținută în colon în fiecare moment, iar pierderile cotidiene uzuale de 5–10 mEq de sodiu și de 6–20 mEq de potasiu sunt neglijabile în bilanțul de săruri ale organismului.

Capacitatea absorbtivă a colonului este folosită pentru administrarea unor medicamente, îndeosebi la copii; sunt astfel absorbite rapid anestezicele, sedativele, tranchilizantele și steroizii.

Aldosteronul și sodiul fecal. Excreția fecală de sodiu la omul normal poate fi cercetată experimental prin creșterea volumului extracelular cu ajutorul perfuziei intravenoase a unei soluții izotonice de NaCl. Se constată că secreția de aldosteron din suprarenale diminuează, iar excreția fecală de Na crește. Un efect invers apare după depleția de sodiu: secreția de aldosteron crește, iar sodiul fecal diminuează.

La om, contribuția colonului la bilanțul energetic general prin absorbția substanțelor nutritive este slabă (absorbția glucozei și aminoacizilor este discutabilă). Se menționează, în schimb, că nutrimentele sintetizate de flora colonului sunt absorbite (riboflavina, acidul nicotinic, biotina, acidul folic). Aceasta face ca timpul de protrombină la nou-născuți să fie adesea alungit în primele zile de viață, când flora intestinală normală care aduce mai târziu vitamina K nu este încă funcțională.

9.2.6.9. Alte căi de absorbție ale organismului

La nivelul tubului digestiv există și alte regiuni, în afara intestinului subțire, unde capacitatea de absorbție este maximă și care prezintă proprietăți absorbitive, dar de mică intensitate.

Astfel, prin mucoasa cavității bucale pot pătrunde o serie de substanțe medicamentoase, ca, de exemplu: nitroglicerina, constituind chiar calea de elecție în administrarea terapeutică, sau substanțe toxice (săruri ale acidului cianhidric).

La nivelul stomacului, celulele mucoasei gastrice au o structură necorespunzătoare funcției de absorbție, totuși trec apa, unii electroliți, unele substanțe liposolubile. Trecerea apei se face în ambele direcții, fenomen care la acest etaj digestiv nu se realizează pe bază de gradienti osmotici, dovadă fiind faptul că soluțiile hiper- și hipotonice se evacuează din stomac înainte de izotonizare.

Prin mucoasa gastrică difuzează mai ușor soluțiile liposolubile. Un exemplu caracteristic în această privință îl constituie etanolul, a cărui absorbție este direct proporțională cu concentrația. Se absorb, de asemenea, acizii și bazele organice, sub formă neionizată și liposolubilă, de exemplu, acizii: acetilsalicilic, acetic, propionic, butiric.

Unele medicamente trec prin mucoasa stomacului mai rapid (de exemplu, cofeina) sau mai lent (de exemplu, barbitatul), în funcție de solubilitatea în lipide.

În căile biliare este prezentă absorbția apei și parțial a pigmentilor și sărurilor biliare, iar prin mucoasa rectală se face trecerea unor substanțe medicamentoase administrate sub formă de clisme sau supozitoare.

Într-un sens mai larg, absorbția se realizează și pe căi nedigestive. Astfel, sunt cunoscute: absorbția peritoneală (experimental, anestezice), prin mucoasa conjunctivală (medicamente ca: atropina, adrenalina, pilocarpina), prin căile respiratorii (aerosoli), prin mucoasa vaginală (medicamente sub formă de ovule), absorbția cutanată [pătrunderea de substanțe volatile (de exemplu, salicilatul de Na) sau substanțe solvite în grăsimi (de exemplu, unguente mercuriale), precum și prin căile subcutanată și intramusculară.

10. METABOLISMUL INTERMEDIAR ȘI ENERGETIC

Majoritatea alimentelor ingerate, prelucrate și degradate la nivel gastro-intestinal până la stadiul de nutrimente asimilabile, este absorbită și transportată pe cale sanguină la nivelul țesuturilor și organelor, pentru a asigura substratul energetic al diverselor manifestări vitale.

Înainte de a ajunge la țesuturile beneficiare, acestea suferă importante transformări la nivelul ficatului.

10.1. FUNCȚIILE METABOLICE ALE FICATULUI

În afara funcțiilor sale de rezervor sanguin și de organ secretor de bilă necesară digestiei intestinale, ficatul deține un rol determinant în realizarea proceselor metabolice de sinteză, degradare sau stocare a substanțelor organice și anorganice absorbite de la nivelul intestinal. El reține, metabolizează sau sintetizează numeroase substanțe utile reacțiilor biochimice locale și generale, transferând substraturi și energie de la un sistem metabolic la altul, pentru a asigura normalitatea unor constante ale mediului intern și adaptarea acestora la necesitățile variabile ale organismului, îndeplinind rolul unui veritabil laborator central. Ficatul intervine atât în metabolismul hidrocarbonatelor, lipidelor și proteinelor, cât și în neutralizarea substanțelor toxice de origine endogenă sau exogenă.

Metabolismul hidrocarbonatelor este influențat pe mai multe căi la nivel hepatic, începând cu depunerea glicogenului și conversia galactozei și fructozei în glucoză și sfârșind cu gluconeogeneza și formarea diversilor compuși de metabolism intermediar. Ficatul este deosebit de important pentru menținerea concentrației normale a glucozei sanguine. Depunerea glucozei sub formă de glicogen în ficat asigură atât îndepărtarea excesului de glucoză din sânge, cât și restabilirea echilibrului glicemic când concentrația acesteia scade sub valorile normale. Ficatul îndeplinește astfel rolul unui adevărat sistem tampon al echilibrului glicemic. Gluconeogeneza hepatică este, de asemenea, implicată în menținerea concentrației normale a glucozei din sânge. Ea devine eficientă numai când conținutul în glucoză al sângelui începe să coboare sub valorile normale. În aceste cazuri, o parte din aminoacizii circulanți se convertește în glucoză, în vederea restabilirii echilibrului glicemic.

Metabolismul lipidelor, deși are loc în aproape toate celulele corpului uman, unele aspecte particulare apar mai ales în ficat. Specifice funcțiilor hepatice sunt ritmul foarte ridicat al beta-oxidării acizilor grași și sinteza unor mari cantități de colesterol, fosfolipide și lipoproteine, precum și conversia hidrocarbonatelor și proteinelor în grăsimi.

Pentru a elibera energie, grăsimile neutre sunt mai întâi scindate în glicerol și acizi grași, care, la rândul lor, vor fi transformați prin beta-oxidare în acid acetoacetic și acetil coenzima A. Aceasta intră în ciclul acizilor tricarboxilici, eliberând mari cantități de energie. Beta-oxidarea este deosebit de intensă și rapidă în ficat. La rândul său, colesterolul sintetizat la nivel hepatic este convertit în proporție de 80% în săruri biliare și secretat în bilă. Fosfolipidele sunt, de asemenea, sintetizate în ficat și transportate de către lipoproteine pe cale sanguină, ca și restul de colesterol, la diversele țesuturi și organe. Atât fosfolipidele, cât și colesterolul sunt utilizate la nivelul celular, intrând în structura membranelor, organelor și substanțelor chinice care asigură funcțiile celulare. Grăsimile sintetizate la nivel hepatic din hidrocarbonate sunt preluate și transportate pentru a fi depozitate în țesutul adipos, în vederea utilizării lor ulterioare.

Metabolismul proteinelor este și mai dependent de participarea ficatului decât cel al hidrocarbonatelor și lipidelor. Dacă unele procese de metabolizare a glucidelor și lipidelor la nivel hepatic pot lipsi, supraviețuirea nu este posibilă fără participarea ficatului la asigurarea metabolismului proteic. Principalele funcții ale ficatului în metabolizarea proteinelor sunt: dezaminarea aminoacizilor, transformarea amoniacului în uree, sinteza proteinelor plasmatiche și interconversiunea dintre anumiți aminoacizi și alți produși de metabolism intermediar.

Dezaminarea aminoacizilor este necesară înainte ca aceștia să fie folosiți în scop energetic sau converșiți în hidrocarbonate și lipide. Pe de altă parte, ficatul îndepărtează amoniacul toxic din umorile organismului. Insuficiența funcției ureogene a ficatului determină fenomenele de intoxicație nervoasă progresivă caracteristice comei hepatice. Pe de altă parte, toate proteinele plasmatiche, cu excepția unei mici părți de gamma-globuline, sunt sintetizate la nivelul celulelor hepatice. Aproximativ 90% din proteinele existente în plasmă sunt de origine hepatică. Excepție fac doar anticorpii formați la nivelul sîrului limfatic. Cantitatea de proteine plasmatiche sintetizată zilnic de celulele hepatice variază între 15 și 50 g. Pierderile mari de proteine sunt urmate de mitoză rapidă a celulelor hepatice și de intensificarea sintezei proteice, în vederea restabilirii concentrației plasmatiche normale. Ficatul posedă o mare capacitate de a sintetiza aminoacizii neesențiali din cetoacizi prin transaminare și, invers, pentru a asigura formarea de glucide din proteine.

Dintre celelalte funcții hepatice cu consecințe metabolice și funcționale generale, fac parte depozitarea vitaminelor A, D și B₁₂, stocarea fierului sub formă combinată cu apoferritină hepatică, sinteza principalilor factori de coagulare a sîngelui, precum și inactivarea sau excreția pe cale biliară a unor hormoni, droguri și substanțe toxice. Rolul ficatului în sinteza pigmentilor și sîrurilor biliare a fost prezentat la capitolul de fiziologie a digestiei intestinale.

10.2. REACȚII ENERGOGENE CELULARE

La baza tuturor formelor de activitate a materiei vii stau procese metabolice de transformare și degradare a principiilor alimentare (glucide, lipide, proteine), în vederea eliberării energiei lor potențiale și utilizării în scop energetic, plastic sau funcțional. Ajunse la nivel celular sub formă de monozaharide (glucoză, fructoză și galactoză), acizi grași și aminoacizi, acestea sunt oxidate în prezența oxigenului, eliberând mari cantități de energie liberă și stocată în legăturile macroergice ale ATP. Acesta este un nucleotid compus din adenină, riboză și trei radicali fosfat. Ultimii doi radicali sunt uniți cu restul moleculei prin legături fosfat înalt energetice (fig. 10.1).

Fiecare din aceste legături conține aproximativ 7 300–8 000 de calorii/mol de ATP în condiții standard și 12 000 de calorii în condiții fiziologice, ceea ce reprezintă mult mai mult decât energia stocată în orice alt compus organic. Cum legăturile fosfat înalt energetice ale ATP sunt foarte labile, scindarea lor în ADP și acid fosforic se realizează instantaneu, ori de câte ori nevoile energetice celulare o impun. ADP rezultat se recombina ulterior cu acidul fosforic, în prezența energiei nou-formate în celulă, pentru a reface ATP și relua ciclul reacțiilor energogene celulare. Pentru acest motiv, ATP a fost denumit „moneda energetică curentă” a celulei, capabilă de scindare și refacere continuă, cu rol de principal carburant celular. Când combustia principiilor alimentare are loc în afara organismului, în prezența oxigenului pur, energia potențială a acestora se eliberează numai sub formă de energie calorică. În condițiile organismelor vii, reacțiile oxidative celulare se produc la nivelul mitocondrial sub

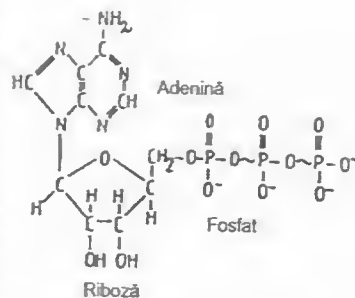
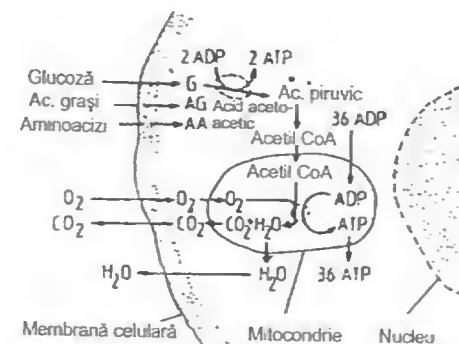


Fig. 10.1. Structura chimică a ATP.

Fig. 10.2. Formarea ATP în celulă.



influența unor enzime specifice, dând naștere la mari cantități de ATP și căldură. Energia calorică liberă rezultată din degradarea principiilor alimentare sau scindarea ATP se exprimă în calorii pe mol și grame de substanță. De exemplu, unitatea de energie eliberată în urma oxidării unui mol de glucoză (180 g glucoză) este de 686 de calorii. Transferul energiei din substanțele alimentare în ATP se realizează prin reacții cuplate de oxido-reducere și fosforilare oxidativă cu randament de 30–40%, restul de 50–60% din energie transformându-se în căldură. Așadar, numai o fracție din energia chimică potențială a nutrienților se depune în legăturile fosfatice ale ATP.

Prezența oxigenului crește considerabil randamentul reacțiilor oxido-reductoare formatoare de ATP. Ca principal depozitar intracelular de energie, ATP se formează în cantități mici (sub 65%) sub influența enzimelor glicolitice din citoplasmă, fără participarea oxigenului. Cea mai mare parte se sintetizează însă în mitocondrii în condiții aerobe. La același nivel sunt converșiți în acil coenzima A atât acidul piruvic rezultat din degradarea citoplasmatică (anaerobă) a glucozei, cât și acizii grași și o mare parte din aminoacizi.

La rândul său, acil coenzima A este scindată progresiv de reacțiile chimice în lanț ale ciclului Krebs (ciclul acidului citric) până la stadiul de produși intermediari, atomi de hidrogen și bioxid de carbon, cu ajutorul enzimelor oxidative de la nivelul creștelor mitocondriale. Energia rezultată din combinarea hidrogenului cu oxigenul activează ATP sintetaza și fosforilarea ADP. ATP rezultat este distribuit apoi atât în citoplasmă, cât și în nucleoplasmă, pentru a energiza funcțiile celulare.

Procesele chimice ale formării predominante de ATP în mitocondrii pe seama energiei extrase din principalele nutrienți (glucoză, acizi grași și aminoacizi) cu participarea obligatorie a oxigenului sunt ilustrate în figura 10.2.

Monozaharidele sunt singurele nutrienți a căror degradare eliberează mici cantități de energie în lipsa oxigenului.

În timp ce glicoliza aerobă dă naștere la 36 de molecule de ATP, degradarea anaerobă în acid piruvic, pentru fiecare mol de glucoză fără participarea oxigenului, se soldează cu formarea doar a două molecule de ATP. Când glicogenul este transformat în acid piruvic, fiecare moleculă de glucoză rezultată din depolimerizarea glicogenului dă naștere la trei molecule de ATP. Spre deosebire de glucoza liberă, a cărei intrare în celulă se realizează cu consumul unui mol de ATP, glucoza provenită din depolimerizarea glicogenului este deja fosforilată. De aici, randamentul energetic ceva mai mare al glicogenului și, de aceea, sursa preferabilă de energie în condiții anaerobe este reprezentată de depolimerizarea acestuia. Ca exemplu se poate da utilizarea energiei anaerobe din timpul hipoxiei acute produse de oprirea temporară a respirației sau de efortul fizic maximal. În astfel de împrejurări este folosită într-un prim moment energia rezultată din scindarea ATP existent în celulele solicitate. Urmează apoi utilizarea energiei stocate în fosfocreatină și a celei rezultate din depolimerizarea glicogenului, pentru ca, ulterior, să se consume ATP format în timpul reacțiilor oxidative. Din această cauză, conținutul în glicogen scade în hipoxie, în timp ce acidul lactic crește. În prezența oxigenului, reacțiile oxido-reductoare mitocondriale transformă 4/5 din acidul lactic în

glucoză, în vederea refacerii stocului de ATP celular, iar 1/5 este îndreptată direct în calea Krebs pentru același scop. Aceasta explică de ce, post-efort, organismul continuă să consume, o anumită perioadă de timp, cantități crescute de oxigen.

Comportându-se ca veritabile baterii energetice celulare, mitocodriile asigură biosinteza la aproximativ 95% din ATP format în celule. Prin energia eliberată, ATP contribuie la patru categorii de procese celulare: (1) transport membranar, (2) sinteză de compuși chimici, (3) lucru mecanic și (4) eliberare de căldură.

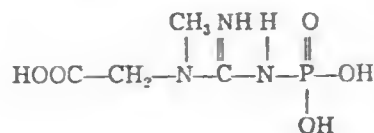
Transportul membranar utilizează cam 25% din energia furnizată de ATP pentru menținerea principalelor gradient electro-chimice celulare cu ajutorul pompelor active de Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Cl⁻, H⁺, urați, fosfați și alie substanțe biologice active. În cazul transportului activ tubular renal, consumul de ATP poate atinge 80% din stocul de nucleotid existent la oivel celulare.

La rândul lor, siotezele de compuși chimici privesc atât formarea de proteine ribozomale, cât și biosinteza de purine, pirimidine, colesterol, fosfolipide etc. În general, sinteza oricărui compus chimic se realizează cu consum de energie. Acesta poate atinge 75% din ATP disponibil în cazul siotezei proteice din perioada de creștere.

Biosinteza unei singure molecule de proteină, de exemplu, necesită câteva sute de mii de molecule de ATP, dacă se are în vedere faptul că formarea fiecărei legături peptidice consumă energia rezultată din ruperea a trei legături fosfat înalt energetice. Mari cantități de ATP se consumă, de asemenea, pentru asigurarea substratului energetic al fenomenelor mecanice de contracție musculară sau simplă mișcare. Consumul de ATP este direct proporțional cu intensitatea și durata manifestărilor mecanice.

Ca principal proces de metabolism intermediar, ATP participă, așadar, atât la extragerea și stocarea energiei potențiale din nutrimente, cât și la reacțiile energogene necesare realizării diverselor manifestări fiziologice.

În afara ATP, depozitarea energiei celulare poate avea loc în legăturile fosfat ale fosfocreatinei. Aceasta se găsește din abundență în celule, prezentând o legătură fosfatică înalt energetică, ce constituie aproximativ 8 500 de calorii *per mol*. Formula sa chimică este:



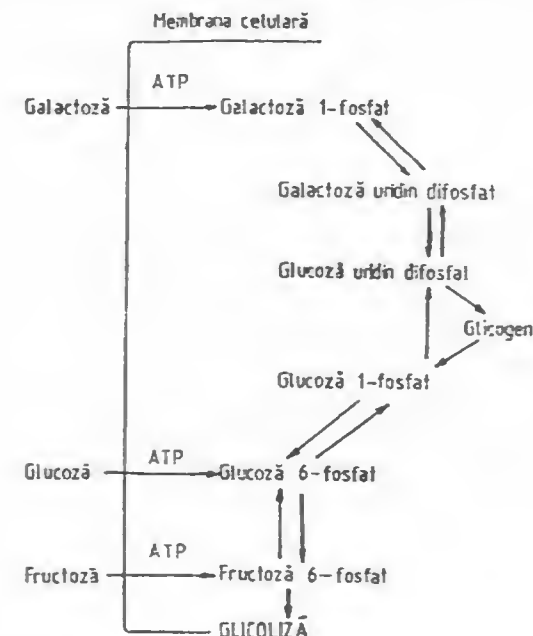
Fosfocreatina participă la transportul interșanjabil de energie, cu ATP. Când cantități disponibile de ATP se găsesc în celulă, o parte din energia acestuia este utilizată la sinteza fosfocreatinei, ca depozitar energetic. Când ATP este utilizat în exces, energia din fosfocreatină este transferată rapid la ATP și, de la acesta, către sistemele funcționale ale celulei. Astfel, se asigură concentrația aproape constantă a ATP câtă vreme celula dispune de cantități suficiente de fosfocreatină ca depozitar al energiei celulare de rezervă. ATP împreună cu fosfocreatina formează un veritabil sistem „tampon” indispensabil asigurării nevoilor variabile de energie ale țesuturilor și organelor. În felul acesta, ATP poate oferi energia necesară sintezei și creșterii, contracției musculare, secrețiilor glandulare, conducerii nervoase, absorbției active și altor activități celulare.

10.3. METABOLISMUL HIDROCARBONATELOR

Înainte de a ajunge la stadiul de produși finali furnizori de energie la nivel celular, nutrimentele suferă o serie de transformări enzimatic.

În cazul monozaharidelor reprezentate de glucoză, fructoză și galactoză, ultimele două monozaharide sunt rapid convertite în glucoză după resorbția intestinală, așa încât doar mici cantități de fructoză și galactoză pot fi găsite în sângele circulant. Glucoza devine astfel cale comună finală de transport și utilizare a glucidelor

Fig. 10.3. Interconversia monozaharidelor în celulele hepatice.



la nivel celular. Ea reprezintă aproximativ 90–95% din monozaharidele sanguine. Fructoza este mai întâi fosforilată și apoi coconvertită în glucoză atât în timpul difuziunii activate intestinale, cât și la nivel hepatic. Galactoză este, de asemenea, supusă conversiunii hepatice până la stadiul de glucoză 6-fosfat (fig. 10.3).

Sub influența glucozo-6-fosfatazei hepatice, glucoza 6-fosfat se poate transforma aproape integral în glucoză. Concentrația în sânge este de 80–100 mg/dl, din care 2/3 în plasmă și 1/3 în hematii. Lichidele intra- și extracelulare prezintă coconcentrații asemănătoare. Raportată la volumul diverselor spații lichidiene, glucoza în organismul uman se găsește în cantitate totală de 50–55 g. În afara de glucoză, o mare parte din glucide se găsește sub formă de glicogen, în ficat și mușchi. Ca produs de polimerizare a glucozei, acesta deține cam 5–8% din greutatea ficatului și 1–3% din greutatea mușchilor, însumând 350–400 g. Conversia glucozei în graule de glicogen hepatic și muscular se realizează sub influența unor enzime specifice glicogenezei, care o transformă rând pe rând în glucoză 6-fosfat, glucoză 1-fosfat, glucoză uridin difosfat și glicogen. Cantități mici de glicogen se găsesc în aproape toate țesuturile. Glicogenul hepatic și muscular nu face parte însă din structura celulară, ci constituie forma de depozitare și rezervă a glucozei, ușor eliberabilă mai ales în cazul celei de origine hepatică.

Glicogenoliza și refacerea glucozei se realizează pe calea inversă a sintezei glicogenului. Acesta este depolimerizat prin fosforilare, catalizată de o fosforilază activată de către adrenalină sau glucagon. Într-un prim moment, cei doi hormoni hiperglicemici stimulează adenilat ciclaza membranară și sioteza de cAMP, care, la rândul său, transformă fosforilaza inactivă în forma activă, glicogenolitică. Spre deosebire de adrenalină, care activează glicogenoliza atât hepatică, cât și musculară, glucagonul stimulează numai glicogenoliza hepatică.

La rândul său, transportul în celulă al glucozei în vederea folosirii sale ca substrat energetic nu se realizează prin simplă difuziune membranară. Având o greutate moleculară de 180 daltoni, glucoza trece în

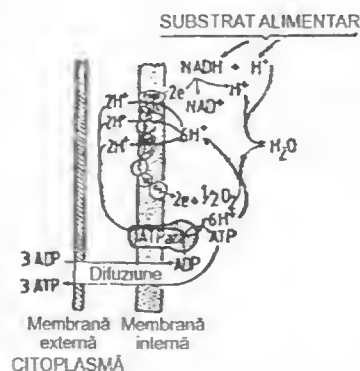


Fig. 10.7. Mecanismul chimio-osmotic al fosforilării oxidative (după Mitchell).

Aproximativ 90% din ATP total rezultat din metabolismul glucozei se formează în cursul oxidării atomilor de hidrogen eliberați în etapele anterioare. Oxidarea hidrogenului este realizată de o serie de reacții catalizate enzimatic în mitocondrii, care disociază fiecare atom de hidrogen în ionul (protonul) respectiv și un electron. În prezența electronilor, oxigenul dizolvat în lichidul mitocondrial este activat și transformat în ioni hidroxil, care se combină cu un ion de hidrogen formând apă.

În cursul acestor reacții oxidative se eliberează mari cantități de energie pentru a forma ATP. Ansamblul lor poartă numele de fosforilare oxidativă.

Fosforilarea oxidativă se realizează printr-un mecanism chimio-osmotic mitocondrial de ionizare a atomilor de hidrogen îndepărtați de pe substraturile alimentare și de activarea lanțului transportor de electroni de la nivelul membranei interne a creștelor mitocondriale. Lanțul transportor este reprezentat de către o serie de receptori de electroni, care pot fi reduși sau oxidați prin acceptarea sau cedarea electronilor respectivi. Din această categorie fac parte flavoproteinele (FAD, FMN), ubiquinona (coenzima Q) și citocromii. Fiecare electron este deplasat de la un acceptor la altul până ajunge la citocromul A_3 , care poartă numele și de citocrom oxidază, datorită

capacității sale de a se autooxida și ceda doi electroni în vederea activării oxigenului și formării de apă.

În cursul transportului de electroni, ionii (protonii) de hidrogen sunt pompați în exteriorul membranei interne a creștelor mitocondriale, determinând creșterea atât a gradientului de concentrație între citosol și matrice, cât și a gradientului electric membranar. Ca urmare a forței combinate a celor două gradientele membranare, ioni de hidrogen traversează membrana internă prin intermediul unei ATPaze, revenind la nivelul matricei mitocondriale. Energia derivată din fluxul ionilor de hidrogen este utilizată la combinarea ADP cu fosfatul anorganic și formarea de ATP cu ajutorul unei ATP sintetaze. Mecanismul electro-chimic al fosforilării oxidative este ilustrat în fig. 10.7.

La baza sa stă creșterea gradientelor electric și de concentrație a protonilor de hidrogen, determinată de transferul de electroni. ATP este generat când protonii revin în matricea mitocondrială, reducând gradientul electro-chimic membranar. Pentru fiecare doi electroni care străbat lanțul transportor, realizând activarea unui atom de oxigen, se formează trei molecule de ATP. Odată sintetizat, ATP este transferat din mitocondrii în citoplasmă prin difuziune și utilizat în funcție de necesitățile celulare. După scindare, ADP citoplasmatic este transferat prin difuziune în matricea mitocondrială, pentru a fi reconvertit în ATP.

Analizând, în rezumat, momentele formării moleculelor de ATP dintr-o moleculă de glucoză, rezultă în ordine următoarele secvențe generatoare:

- în timpul glicolizei se formează 4 molecule de ATP, din care rămân cu valoare netă numai 2 molecule de ATP (celelalte 2 fiind cheltuite în procesul inițial de fosforilare a glucozei din cursul glicolizei);
- ciclul Krebs produce la rândul său 2 molecule de ATP;
- oxidarea a 20 de atomi de hidrogen dintr-un total de 24 rezultă din glicoliză și ciclul Krebs eliberează, în cursul fosforilării oxidative, 3 molecule de ATP pentru câte 2 atomi de hidrogen metabolizați, ceea ce înseamnă un total de 30 de molecule ATP;

- restul de 4 atomi de hidrogen, care trec direct în procesul de oxidare, generează 2 molecule de ATP pentru fiecare 2 atomi de hidrogen oxidați (total 4 molecule de ATP).

Însumând energia rezultată din degradarea fiecărei molecule de glucoză până la stadiul de bioxid de carbon și apă, se constată că randamentul net al acesteia este de 38 de molecule de ATP (2 molecule din glicoliză și 36 de molecule din reacțiile oxido-reductoare mitocondriale). În lipsa oxigenului, fosforilarea oxidativă nu poate avea loc din cauză că acidul piruvic este convertit în acid lactic. Acesta poate fi însă reconvertit în prezența oxigenului în acid piruvic la nivelul ficatului și mușchiului cardiac, pentru a servi apoi ca sursă energetică.

10.3.2. CALEA FOSFOGLUCONAT

Calea fosfogluconatului reprezintă cea de a doua cale importantă de degradare și oxidare a glucozei. Aceasta este responsabilă de aproximativ 30% din metabolizarea glucozei în ficat și celulele lipidice. Chiar de la primele etape degradative, glucoza eliberează o moleculă de CO_2 și 4 atomi de hidrogen, cu formarea unui zahăr cu 5 carboni, D-ribuloza. Diverșii produși intermediari ai acesteia refac doar 5 din cele 6 molecule de glucoză intrate inițial în reacție. O moleculă de glucoză este metabolizată în timpul fiecărui ciclu al căii fosfogluconat. În decursul câtorva cicluri, toată glucoza poate fi convertită în CO_2 și hidrogen, care, intrând în reacțiile de fosforilare oxidativă, va contribui la sinteza de ATP sau de lipide. Folosirea atomilor de hidrogen eliberați în timpul ciclului fosfogluconat la sinteza de lipide necesită combinarea acestora cu NADP^+ și nu cu NAD, ca în calea glicolică. Radicalul fosfat al NADP^+ este esențial, întrucât numai legătura cu acesta a hidrogenului sub formă de NADPH poate servi la sinteza grăsimilor din hidrocarbonate. Când glicoliza este neînsemnată din cauza inactivității celulare, calea fosfogluconat continuă să rămână activă, mai ales în ficat, pentru a degrada și converti glucoza cu participarea NADPH și lanțuri de acizi grași.

Conversia glucozei în glicogen sau grăsimi. Glucoza neutilizată imediat în scop energetic este depusă în celule sub formă de glicogen sau convertită în grăsimi. Depunerea preferențială de glicogen este limitată la stocul necesar organismului pentru 12–24 de ore. După saturarea celulelor hepatice și musculare cu glicogen, surplusul de glucoză este convertit în lipide depuse în celulele grasoase.

10.3.3. GLUCONEOGENEZA

Când rezervele de glucoză ale organismului scad sub nivelul normal, cantități suficiente pot fi formate din aminoacizi și glicerol prin procesul de gluconeogeneză. Aproximativ 60% din aminoacizii existenți în proteinele tisulare pot fi ușor convertiți în hidrocarbonate. Alanina, de exemplu, poate fi transformată direct în acid piruvic prin simplă dezaminare. La rândul său, glicocolul dă naștere printr-o dublă interconversie coenzimei A; iar acizii aspartic și glutamic intră în ciclul acizilor tricarboxilici Krebs. Pe de altă parte, glicerolul fosfatat se transformă în trioză, în timp ce acizii grași suferiți beta-oxidării sunt convertiți în acetil coenzima A. Intrând în ciclul acizilor tricarboxilici, atât acidul piruvic, cât și acetil coenzima A participă la formarea și metabolizarea hidrocarbonatelor.

Gluconeogeneza este stimulată de hormonii glucocorticoizi și, îndeosebi, de către cortizol. Acesta mobilizează niii aminoacizi din proteinele tisulare, pentru a servi după dezaminarea hepatică drept substraturi la sinteza glucozei. Pe de altă parte, hormonii tiroidieni determină mobilizarea acizilor grași și glicerolului din depozite, contribuind la conversia glicerolului în glucoză. Ceilalți factori de conversie și reglare a echilibrului glicemic vor fi menționați ulterior, la capitolul de fiziologie endocrină.

10.4. METABOLISMUL LIPIDIC

Considerate mult timp ca fiind relativ inerte, atât lipidele de rezervă, cât și cele circulante prezintă un intens metabolism intermediar și energetic. Tesutul adipos larg distribuit în aproape întregul organism reprezintă cam 20% (15 kg) din greutatea unui adult tânăr normal.

Celulele grasoase ale țesutului adipos sunt fibroblaști modificați, capabili să stocheze trigliceride în cantități egale cu 80–95% din volumul lor.

10.4.1. REPARTIȚIA ȘI TRANSPORTUL LIPIDELOR

Țesutul adipos constituie principala sursă de grăsimi neutre sau trigliceride circulante. Sub influența lipazelor, acestea sunt depozitate sau degradate, determinând eliberarea acizilor grași liberi în sângele circulant. Datorită schimbărilor rapide ale acizilor grași, trigliceridele din țesutul adipos sunt reînnoite la fiecare 2-3 săptămâni.

În afara trigliceridelor și acizilor grași liberi, mari cantități de fosfolipide și colesterol se găsesc în organism mai ales sub formă de combinații lipoproteice în structurile celulare (membrane, mitocondrii, reticul endoplasmatic, aparat Golgi etc.). Ca lipide de constituție, concentrația lor este constantă și caracteristică fiecărui țesut. Deși nu sunt utilizate în scop energetic, ele nu sunt inerte din punct de vedere metabolic, ci prezintă o importantă viteză de reînnoire.

Totalitatea lipidelor conținute de plasma sanguină și umorile organismului constituie lipidele de circulație. Plasma conține 500-700 mg/dl de diferite lipide totale, sub formă combinată cu proteinele plasmatică. Preluarea acestora de la nivel gastro-intestinal se realizează sub formă de chilomicroni, pe cale predominant limfatică. Culoarea lactescentă a limfei și plasmiei sanguine după ingestie de grăsimi se datorește resorbției și pătrunderii în circulație a trigliceridelor din lumenul intestinal, sub formă de picături cu diametrul de 0,1-0,5 μm stabilizate de o peliculă fină de fosfolipide, colesterol și proteine (apoproteina B). Aceste agregate conțin, în afara trigliceridelor, aproximativ 9% fosfolipide, 3% colesterol și 1% apoproteina B. Trigliceridele sunt preluate din epitelul intestinal, în urma sintezei lor locale din acizi grași și glicerol, resorbții din lumenul tubului digestiv.

Scurtă vreme după absorbție, chilomicronii sunt îndepărtați din circulație ca urmare a hidrolizării trigliceridelor în acizi grași și glicerol de către o lipoprotein lipază prezentă în endoteliul capilarelor din țesutul grăos și ficat. Acizii grași rezultați, fiind miscibili cu membranele celulare, difuzează în celulele țesutului grăos și în ficat pentru a participa fie la resinteza trigliceridelor, fie la reacțiile energogene sau plastice celulare. Astfel, întreaga masă de chilomicroni este îndepărtată din sângele circulant în mai puțin de 1-2 ore de la formare.

Trigliceridele, ca principali constituenți ai chilomicronilor, sunt formate din trei molecule de acizi grași cu lanț lung, cuplate cu o moleculă de glicerol. La om, cei trei acizi grași sunt: acidul stearic cu 18 carboni în lanț, saturați cu atomi de hidrogen, acidul oleic, tot cu 18 carboni în lanț, dar cu o dublă legătură în mijlocul acestuia, și acidul palmitic, cu 16 atomi de carbon saturați (fig. 10.8).

Concentrația trigliceridelor în plasma sanguină și lichidele extracelulare variază, în general, în jur de 125-150 mg/dl.

În afara originii lor alimentare, trigliceridele pot rezulta prin conversia hidrocarbonatelor și proteinelor în acetil coenzimă A. În cazul hidrocarbonatelor, prima treaptă în sinteza trigliceridelor este

reprezentată de conversia lor în acetil coenzimă A. La rândul său, acetil coenzimă A poate fi transformată în acizi grași via malonil CoA și utilizând NADPH în procesul de polimerizare.

Cuplarea moleculei de glicerol (furnizat de alfa-glicerofosfatul rezultat din degradarea glicolitică a glucozei) cu acizi grași, rezultați din transformarea acetil coenzimei A, duce la sinteza de trigliceride din hidrocarbonate (fig. 10.9).

Eficiența energetică a conversiei hidrocarbonatelor în trigliceride este de 85%. Sinteza de lipide din hidrocarbonate este importantă din cel puțin două rațiuni. Mai întâi, aceasta constituie un mijloc mai eficient de stocare a energiei oferite de ingestia exagerată de glucide decât în cazul depozitării sale sub formă de glicogen. Energia depozitată în trigliceride este de 150 de ori mai mare decât cea din glicogen. În al doilea rând, fiecare gram de grăsime conține de 2,25 ori mai multe calorii decât gramul de glicogen. În plus, conținutul în glicogen al ficatului, musculaturii scheletice și altor organe este limitat de 300-400 g, în timp ce țesutul adipos reprezintă peste 10 kg. În absența insulinei, sinteza de trigliceride și acizi grași este puternic deprimată, ca urmare a incapacității glucozei de a intra în celulele grasoase și hepatice spre a fi metabolizată și transformată în lipide.

Dintre proteine, mulți aminoacizi converțiți în acetil coenzimă A contribuie la sinteza de trigliceride și acizi grași, prin procese enzimo-chimice ce vor fi menționate în subcapitolul următor.

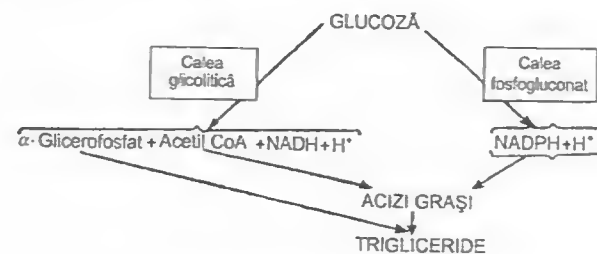


Fig. 10.9. Sinteza de trigliceride dihidrocarbonate.

Acizii grași circulanți: când trigliceridele depozitate în celulele adipoase trebuie utilizate în scop energetic de către alte țesuturi, ele sunt mai întâi hidrolizate și apoi transportate sub formă de acizi grași liberi. Aceștia sunt acizi grași neesterificați, ușor insolubili, ce se combină rapid cu o albumină plasmatică. Concentrația în plasmă este, în condiții de repaus, de aproximativ 15 mg/dl. Deși se găsesc în concentrații mici, turnover-ul acizilor grași liberi este foarte rapid. Jumătate din ei sunt înlocuiți la fiecare 2-3 minute, asigurând o mare parte din energia necesară organismului. Concentrația și ritmul de utilizare a acizilor grași liberi crește în condiții de starvare sau în diabet, când hidrocarbonatele nu mai asigură un aport energetic suficient. În condiții normale, trei molecule de acizi grași se combină cu o moleculă de albumină. În timpul solicitărilor fizice maxime, numărul moleculelor de acizi grași fixați pe o singură moleculă de albumină poate crește până la 30, pentru a asigura transportul corespunzător de substrat energetic. În afara acizilor grași liberi, plasma sanguină conține cantități, de asemenea, mici de acizi grași esterificați. Aceștia se găsesc sub formă de esteri ai colesterolului, glicerolului sau altor derivați lipidici. Oxidarea lor în vederea eliberării de energie și formării de ATP se realizează după conversia în acizi grași liberi.

Hidroliza trigliceridelor în acizi grași și glicerol este determinată de scăderea glucozei și glicerofosfatului din sânge, pe de o parte, și de activarea unei lipaze celulare hormonodependente, pe de altă parte. După îndepărtarea chilomicronilor din sânge, peste 95% din lipidele plasmatică totale sunt reprezentate de lipoproteine.

Lipoproteinele sunt particule mai mici decât chilomicronii, cu compoziție însă similară acestora. Ele conțin, ca și chilomicronii, trigliceride, colesterol, fosfolipide și proteine. Aproximativ 2/3 din lipoproteinele circulante sunt lipide propriu-zise, iar 1/3 sunt proteine. Concentrația lipoproteinelor din plasmă variază în jurul a 700 mg/dl. Prin degradare, ele dau naștere la 180 mg/dl colesterol, 160 mg/dl trigliceride, 160 mg/dl fosfolipide și 200 mg/dl proteine.

Tipurile de lipoproteine diferențiate în funcție de densitatea lor, cu ajutorul ultracentrifugării, sunt: lipoproteine de densitate foarte mică (VLDL), bogate în trigliceride; lipoproteine de densitate mică (LDL), cu conținut bogat în colesterol; lipoproteine de densitate înaltă (HDL), bogate în proteine (peste 50%) și cu concentrații mai mici de lipide.

Formarea lipoproteinelor are loc aproape exclusiv în ficat. Mici cantități de HDL pot fi sintetizate în epitelul intestinal în timpul absorbției acizilor grași.

Funcția lipoproteinelor este de transport al lipidelor în întregul organism. Trigliceridele, de pildă, sunt transportate la țesutul adipos și alte teritorii periferice de către VLDL. La rândul lor, LDL sunt lipoproteine reziduale, rezultate după cedarea trigliceridelor din VLDL, cu concentrații mari de colesterol și fosfolipide. Pe de altă parte, HDL transportă colesterol la ficat, prevenind dezvoltarea aterosclerozei.

Colesterolul, deși nu conține acizi grași decât în cazul fracției sale esterificate, nucleul său steroic rezultă din producția de degradare a acestora (fig. 10.10).

El este sintetizat din acetil coenzimă A atât în celulele hepatice, cât și în numeroase alte tipuri de celule. La colesterolul endogen sintetizat la nivel celular se adaugă mici cantități de colesterol exogen, absorbit zilnic din tubul digestiv. Concentrația sa plasmatică variază în jurul a 180-200 mg/dl. Conținutul în colesterol al plasmiei depinde de ingestia zilnică de lipide și de concentrația hormonilor tiroidieni și gonadali din sânge.

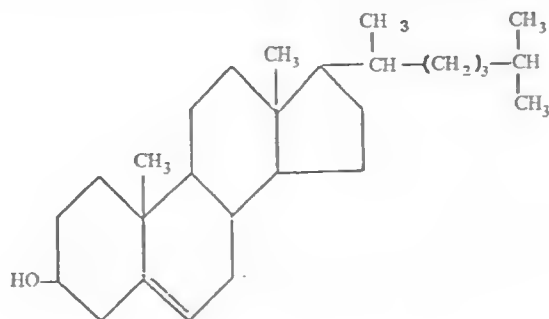
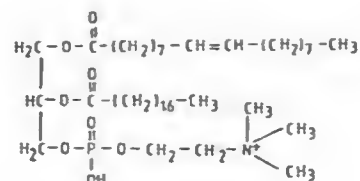
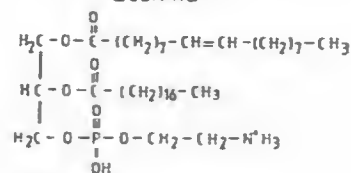


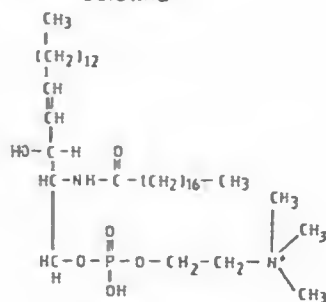
Fig. 10.10. Formula chimică a colesterolului.



Lecitină



Cefolină



Sfingomielină

Fig. 10.11. Fosfolipidele clasice.

În condiții normale, colesterolul exogen de origine alimentară reglează biosinteza de colesterol endogen prin relații de *feed-back* negativ și pozitiv, încât variațiile plasmatice nu depășesc 15-25%. Deficitul de hormoni tiroidieni crește concentrația colesterolului, iar excesul secretor tiroidian o scade. La rândul lor, estrogenii scad colesterolul din sânge, în timp ce androgenii îl cresc.

Rolul colesterolului în organism este multiplu. Până la 80% este folosit la sinteza acidului colic, în vederea sintezei de săruri biliare necesare digestiei și absorbției grăsimilor. O mică proporție este utilizată la formarea hormonilor corticosuprarenali și gonadali.

Cantități mari sunt precipitate în țesutul cornos al pielii, crescând rezistența acesteia atât la substanțele solubile în apă, cât și la evaporarea prin piele. Ca furnizor de energie, colesterolul nu intervine decât prin acizii eliberați de fracția sa esterificată.

Fosfolipidele conțin unul sau mai mulți acizi grași și un radical fosfat, cuplate de regulă cu o bază azotată. Principalele fosfolipide din organism sunt lecitinele, cefalinele și sfingomielinele (fig. 10.11).

Funcțiile de utilizare a fosfolipidelor sunt multiple, începând cu formarea și transportul lipoproteinelor și sfârșind cu prezența lor în sistemul nervos și membranele biologice în general. Pe plan energetic, oferă radicali fosfați pentru reacțiile formatoare de legături macroergice. Deși nu sunt solubile în apă, fosfolipidele asigură împreună cu colesterolul fluiditatea membranelor. Concentrația lor în lichidele extracelulare variază în jur de 280 mg/dl.

Din datele de biochimie funcțională a lipidelor, succint menționate până aici, rezultă că dintre acestea trigliceridele constituie principalul furnizor de energie lipidică. Acestea provin fie din grăsimile ingerate, fie din conversia hidrocarbonatelor.

10.4.2. METABOLIZAREA TRIGLICERIDELOR ȘI FORMAREA ATP

Prima treaptă în utilizarea trigliceridelor ca substrat energetic este hidroliza acestora în acizi grași și glicerol, urmată de transportul la nivelul țesuturilor active. Aproape toate celulele, cu excepția celor din creier, pot utiliza acizii grași ca furnizori de energie. La rândul său, glicerolul este transformat de enzimele intracelulare în glicerol 3-fosfat, care intră apoi în gluconeogeneză.

Înainte de a fi utilizați ca substrat energetic, acizii grași intră în mitocondrii cu ajutorul carnitinei ca transportor. Degradarea și oxidarea acestora are loc numai în mitocondrii, după dislocarea carnitinei. Molecula de acid gras se transformă în acetil coenzima A prin procesul de beta-oxidare (fig. 10.12).

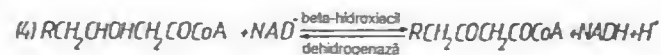
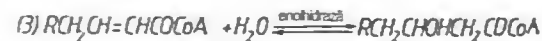


Fig. 10.12. Formarea acetil coenzimei A prin beta-oxidarea acizilor grași.

Aceasta constă în oxidarea carbonului beta al acidului gras respectiv, urmată de îndepărtarea a doi ioni de hidrogen și ruperea moleculei între carbonii alfa și beta, cu eliberare de acil coenzima A. Procesul de beta-oxidare se repetă eliberând oii molecule de acil coenzimă A, pentru fiecare moleculă nou-formată punându-se în libertate patru atomi de hidrogen. Aceștia sunt oxidați în mitocondrie, pentru a contribui la formarea unor oii molecule de ATP.

După ce a avut loc transformarea acizilor grași în acil coenzimă A, oxidarea în continuare a acestora este comună cu a celei formate din acidul piruvic în cursul metabolizării glucozei. Randamentul energetic al degradării acizilor grași, exprimat în molecule de ATP, este însă cu mult mai mare. Oxidarea acidului stearic, de pildă, în ciclul acizilor tricarboxilici, soldându-se cu eliberarea a 104 atomi de hidrogen, realizează formarea a 146 de molecule de ATP. O mare parte din acizii grași degradați în ficat până la stadiul de acil coenzimă A participă la sinteza de acid acetoacetic. Acesta rezultă din condensarea a două molecule de acil coenzimă A și geoează, la rândul său, acidul beta-hidroxibutiric și mici cantități de acetone (fig. 10.13).

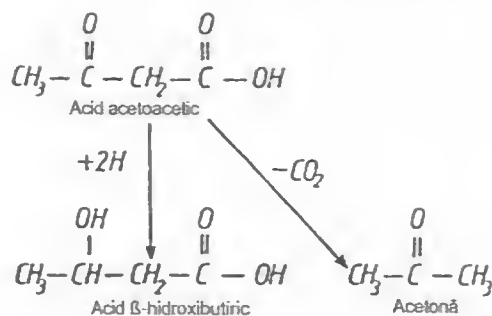


Fig. 10.13. Transformarea acidului acetoacetic, cu eliberare de acetone.

Atât acidul acetoacetic, cât și acidul beta-hidroxibutiric ajung pe cale sanguină în țesuturile periferice participă la reacțiile inverse de refacere și degradare a acil coenzimei A în vederea eliberării de energie. Transportul și metabolizarea rapidă a acestora determină concentrația lor plasmatică să nu depășească 3 mg/dl.

Când aportul de glucide este insuficient sau hidrocarbonatele nu pot fi utilizate în scop energetic, mari cantități de energie se formează pe seama metabolizării predominante a lipidelor. Asemenea situații se întâlnesc în inanție și diabetul zaharat, însoțite fiind de creșterea acetonei și acizilor acetoacetic și beta-hidroxibutiric în sânge și lichidele interstițiale. Starea respectivă este denumită cetoză, iar cei trei compuși, corpi cetonici.

Capacitatea celulelor de a oxida corpi cetonici în diabet fiind limitată, concentrația acestora în sânge poate crește de 20-30 de ori, ducând la instalarea unor stări grave de acidoză.

Doar acetona, fiind volatilă, poate fi eliminată parțial prin plămâni în timpul expirului.

Reglarea metabolizării trigliceridelor. În prezența unor cantități adecvate de glucide, utilizarea trigliceridelor este neînsemnată. Hidrocarbonatele exercită în acest caz un veritabil efect de economisire a lipidelor. Trigliceridele vor fi mai mult depozitate decât degradate, ca urmare a formării în exces a acil coenzimei A și conversiei sale în acizi grași. Mai importantă decât conversia hidrocarbonatelor în lipide este activarea acil CoA carboxilazei de către unii intermediari ai ciclului Krebs, în exces. Sub influența acesteia, acil coenzima A este transformată în malonil coenzima A și acid stearic (fig. 10.14).

Astfel, ingestia exagerată de hidrocarbonate realizează nu numai economisirea lipidelor, ci și depozitarea lor în țesutul gras.

În absența hidrocarbonatelor se produc reacții inverse de mobilizare și utilizare mai intensă a lipidelor ca substrat energetic, cu participarea mai multor factori hormonal. Printre aceștia figurează secreția redusă

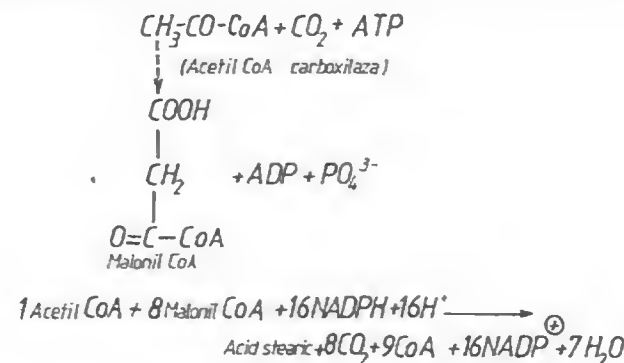


Fig. 10.14. Sinteza acizilor grași și a malonil coenzimei A din hidrocarbonate.

de insulină și crescută de adrenalină, cu rol activator al trigliceridelor și mobilizării acizilor grași. Efecte similare de activare a eliberării de acizi grași din depozite exercită și hormonii tiroidieni, întregite de intensificarea proceselor de gluconeogeneză determinate de hipersecreția glucocorticoizilor suprarenali. În modul acesta, deficitul de hidrocarbonate afectează metabolismul lipidic și invers, realizând un veritabil autocontrol homeostatic între glucoză, pe de o parte, și acizii grași, pe de altă parte.

10.5. METABOLISMUL PROTEINELOR

Spre deosebire de glucide și lipide, proteinele, preluate sub formă de aminoacizi din lumenul intestinal de către sângele venei porte și limfă, sunt transportate și utilizate la nivelul tuturor țesuturilor în scop predominant plastic. După prânzuri bogate în substanțe proteice, concentrația plasmatică a aminoacizilor poate crește de 3-5 ori pentru ca apoi să scadă rapid, ca urmare a captării lor tisulare și, mai ales, hepatice, în vederea participării la procesele de sinteză a proteinelor circulante și structurale sau a transformării lor în glucide și lipide. Atât proteinele de structură, cât și cele circulante se degradează și se reconstituie în permanență. Viteza de reînnoire a stocului proteic circulant la adultul sănătos este în medie de două săptămâni. Reînnoirea se efectuează pe baza schimbului reciproc de aminoacizi ai structurilor celulare, pe de o parte, și ai fondului comun din plasmă și lichidul interstițial, pe de altă parte. Refacerea structurilor proteice uzate în cursul activității metabolice și fiziologice impune un ritm de primenire continuă a proteinelor tisulare, evaluat la 80-100 g în 24 de ore. Acesta este asigurat atât de aportul alimentar zilnic, cât și de adăugarea la fondul proteic comun a unei părți din aminoacizii eliberați în cursul degradării de proteine tisulare.

În afara rolului plastic, cei 20 de aminoacizi pot constitui o sursă importantă de cetoacizi, ca urmare a dezaminării lor oxidative sau a altor interconversii metabolice.

Cetoacizii rezultați din degradarea aminoacizilor pot intra fie în ciclul acizilor tricarboxilici, în vederea oxidării lor complete sau a sintezei de glucide și lipide, fie în reacții de transaminare, pentru a contribui la refacerea unor acizi aminați. Sensul și intensitatea acestor reacții depind de reglarea neurohormonală supracelulară, mai puțin cunoscută în cazul metabolismului intermediar proteic.

Aminoacizii constituiți dintr-o grupare acidă (COOH) și un radical azotat (-NH₂) atașat acesteia se găsesc larg distribuiți în organism, fie ca atare, în umorile organismului, fie în lanțurile peptidice ale proteinelor structurale, enzimelor, nucleoproteinelor, proteinelor contractile sau transportoare de gaze, hormonilor etc.

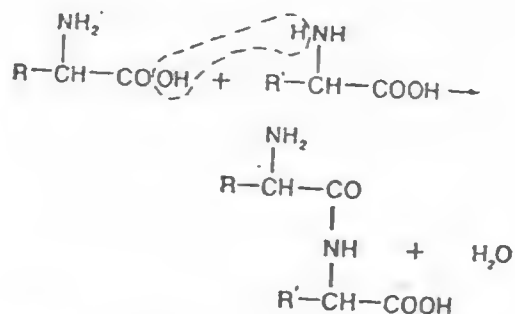


Fig. 10.15. Formarea unei legături peptidice.

În sânge, concentrația lor variază între 35 și 65 mg/dl. În proteine, aminoacizii sunt dispuși sub forma unor agregate de lanțuri peptidice, în care azotul radicalului amino al unui aminoacid se leagă cu carbonul radicalului carboxil al altui aminoacid, cu formarea unei molecule de apă, de maniera următoare (fig. 10.15).

O mare parte dintre aminoacizi pot fi sintetizați în organism, suplinind lipsa sau deficitul aportului alimentar. Este cazul glicinei, alaninei, serinei, cisteinei, prolinei, acizilor glutamic și aspartic, asparaginei și glutaminei, denumiți pentru acest motiv și aminoacizi neesențiali. Un număr de 10 aminoacizi nu poate fi însă sintetizat la nivelul organismului, singura sursă rămânând cea alimentară. Aceștia sunt aminoacizii esențiali: triptofanul, histidina, lizina, metionina, arginina, valina, fenilalanina, leucina și izoleucina.

Pătrunderea lor în celule se realizează prin difuziune facilitată sau transport activ. După intrarea în celule, aminoacizii sunt utilizați fie în procesele plastice de sinteză proteică sub controlul ARN mesager și al sistemului ribozomal, fie în reacțiile de dezaminare și transaminare în vederea transformării și utilizării lor în scop energetic și funcțional.

Când concentrația aminoacizilor din plasmă scade sub valorile normale, aceștia sunt transportați în afara celulelor pentru a restabili valorile normale. În general, fiecare tip de aminoacid este menținut în limite constante. Între aminoacizii plastici și proteinele tisulare există o stare de echilibru dinamic, asigurată de participarea ficatului și a altor țesuturi la sinteza sau degradarea rapidă a acestora. Dacă un țesut oarecare pierde proteine, el poate să le sintetizeze din aminoacizii circulanți și invers, aceștia pot fi restabiliți prin degradarea proteinelor din anumite celule ale organismului. Fiecare celulă are o limită superioară de depozitare sau utilizare a aminoacizilor. După ce a fost atinsă această limită, excesul de aminoacizi din circulație este degradat în produși intermediari și convertit în glucide sau lipide energogene.

Rolul energetic al proteinelor este realizat prin intermediul și participarea obligatorie a aminoacizilor din plasmă. În timp ce albuminele plasmatice asigură presiunea osmotică a plasmiei, globulinele sunt responsabile de imunitatea naturală și câștigată, iar fibrinogenul polimerizat realizează formarea cheagului. Aminoacizii sunt utilizați atât la sinteza și degradarea edificiului macromolecular proteic din celule, cât și ca furnizori de energie, în lipsa unor cantități suficiente de glucide sau lipide.

Utilizarea proteinelor în scop energetic începe cu procesul de dezaminare, realizat aproape integral la nivel hepatic cu ajutorul aminotransferazelor.

Îndepărtarea unei grupări aminice (dezaminarea) se poate realiza fie prin dezaminare oxidativă, fie prin transaminare, conform schemei (fig. 10.16).

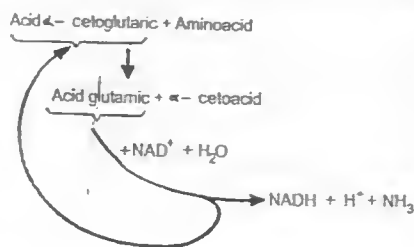


Fig. 10.16. Reacțiile de transaminare-dezaminare.

În exemplul de față, gruparea amino este transferată acidului alfa-cetoglutaric, care devine astfel acid glutamic. Acesta transferă gruparea amino altei substanțe sau o poate elibera sub formă de amoniac, transformându-se din nou în acid alfa-cetoglutaric, pentru a relua ciclul. Dezaminarea oxidativă deține un loc mai puțin important și se realizează cu ajutorul aminooxidazelor. Amoniacul eliberat în timpul dezaminării este îndepărtat din sânge prin conversie în uree, rezultată din combinarea a două molecule de amoniac cu o moleculă de bioxid de carbon. Formarea ureei are loc în ficat în două etape. Într-un prim moment, câte o moleculă de amoniac și bioxid de carbon se combină cu ornitina pentru a forma citrulina. Aceasta se combină cu o nouă moleculă de amoniac formând arginina, care se desface, sub influența arginazei, în uree și ornitină (fig. 10.17).

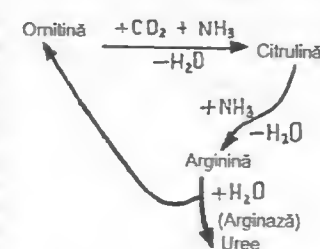


Fig. 10.17. Ciclul formării ureei.

În timp ce ureea este eliminată prin urină, ornitina este reutilizată în ciclul respectiv.

După dezaminare, cetoacidul rezultat este transformat într-un produs intermediar al ciclului Krebs și degradat până la bioxid de carbon și apă, cu eliberare concomitentă de energie. Cantitatea de ATP sintetizat din fiecare gram de aminoacid oxidat este ceva mai mică decât cea rezultată din degradarea unui gram de glucoză.

Unii aminoacizi dezaminați sunt similari cu produșii de degradare ai glucozei sau acizilor grași. Alanina dezaminată, de exemplu, dă naștere acidului piruvic. Acesta, putând fi convertit în glucoză, se transformă în glicogen sau acetil coenzimă A, din a cărei polimerizare rezultă acizi grași.

De asemenea, două molecule de acetil coenzimă A se pot condensa formând acidul acetoacetic, care este unul din cei trei corpi cetonici.

Conversia aminoacizilor în glucoză sau glicogen poartă numele de gluconeogeneză. Aceasta are loc în cazul a 18 din cei 20 de aminoacizi. La rândul său, transformarea acizilor aminați în cetoacizi sau acizi grași este numită cetogeneză. Ea se realizează în cazul a 19 aminoacizi din care 5 direct în grăsimi și 14 prin intermediul hidrocarbonatelor.

Reglarea metabolismului proteic are la bază participarea hormonului de creștere, insulinei, glucocorticoizilor, testosteronului și tiroxinei. Astfel, hormonul de creștere și insulina intensifică sinteza de proteine celulare ca urmare a creșterii permeabilității membranare pentru aminoacizi; la rândul lor, glucocorticoizii mobilizează proteinele tisulare extrahepatice prin intensificarea catabolismului acestora, pentru a asigura concentrația sanguină constantă în aminoacizi a plasmiei și sinteza hepatică de proteine, glucide sau lipide.

În sfârșit, testosteronul favorizează depunerea aminoacizilor în țesuturi, iar tiroxina crește degradarea și mobilizarea proteinelor tisulare în vederea utilizării lor în scop energetic, când aportul de glucide sau lipide este insuficient.

Transferul de energie de la nutrimente la ATP și derivații săi cu răsunsetul funcțional celular este ilustrat în figura 10.18.

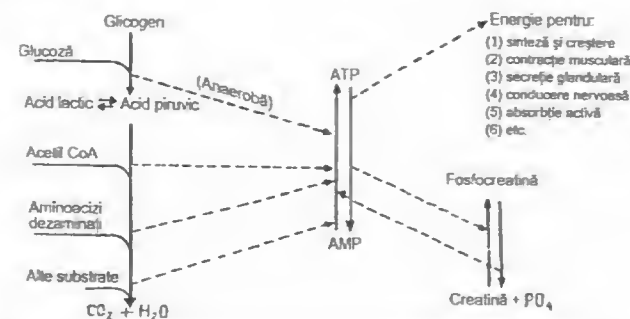


Fig. 10.18. Schema transferului de energie de la nutrimente la derivații acidului adenilic spre organele efectoare

Este menționată atât degradarea anaerobă a glucozei și glicogenului, cât și utilizarea compușilor derivați din lipide, proteine și alte substanțe în reacțiile oxido-reducătoare ale sintezei de ATP. Este inclus, de asemenea, echilibrul acestuia cu fosfocreatina din celule. Totodată, sunt enumerate principalele consecințe funcționale ale eliberării energiei din legăturile macroergice ale ATP, începând cu creșterea, conducerea nervoasă și contracția musculară și sfârșind cu transportul activ și secrețiile glandulare.

10.6. METABOLISMUL BAZAL

Căldura, ca factor comun al energiei eliberate în timpul formării ATP, reprezintă peste 50% din energia potențială a nutrienților. Cantități suficiente de energie calorică se pierd, de asemenea, în timpul transferului de energie de la ATP la sistemele funcționale ale celulelor. În felul acesta, doar 20–25% din energia furnizată de nutrienți este în final utilizată de către sistemele funcționale celulare. Și energia rezultată din ATP degradat în cursul diverselor forme de activitate celulară se transformă în energie calorică, așa încât, în final, toată energia formată și cheltuită în organism este convertită în căldură. De aceea, determinarea ei prin mijloace directe sau indirecte reflectă intensitatea proceselor metabolice energogene.

Consumul energetic minim necesar menținerii funcțiilor vitale reprezintă *metabolismul bazal* sau de *întreținere*.

Metabolismul bazal, ca expresie a eliberării de energie calorică în cursul reacțiilor chimice, poate fi apreciat cu ajutorul calorimetriei directe și indirecte.

Calorimetria directă constă în simpla măsurare a cantității de căldură eliberată de organism într-un timp dat. Determinarea energiei calorice degajate se realizează cu ajutorul calorimetrelor cu gheață, apă, gaze sau aer. În cazul calorimetrelor cu gheață, folosite inițial, se aprecia intensitatea proceselor metabolice generatoare de energie calorică în funcție de cantitatea de apă care se scurgea la exterior. Ulterior, s-au construit calorimetre cu apă sau diferite gaze, inclusiv aer, imaginându-se o gamă variată de modele bazate pe același principiu. Calorimetrul propus de Lefèvre, de exemplu, preconiza introducerea subiectului într-o baie a cărei variație termică permitea calcularea producerii de căldură de origine metabolică.

Metoda calorimetriei prin încălzirea unui corp constă în determinarea cantității de căldură necesară creșterii cu 1°C a temperaturii acestuia. Cunoșcând greutatea sau volumul corpului respectiv și căldura sa specifică se poate calcula energia calorică degajată și exprimată în kilocalorii după formula următoare:

$$Q_{\text{kcal}} = M(t_2 - t_1)$$

în care M = greutatea în kg a corpului introdus în calorimetru, t_1 = temperatura la începutul determinării și t_2 = temperatura la sfârșit.

La rândul său, calorimetria prin vaporizare sau fuziune are la bază principiul măsurării căldurii folosite la schimbarea stării solide a unui corp în stare gazoasă (vaporizare) sau în stare lichidă (fuziune). Căldura de fuziune (topire) a gheții, de pildă, fiind de 79,2 kcal, producția de căldură corespunzătoare fuziunii sale, apreciată în funcție de apa rezultată, va fi:

$$Q_{\text{kcal}} = 79,2 \text{ kcal} \times P \text{ (masa în kg a gheții)}$$

Variațiile de volum sau presiune ale unor gaze pot fi, de asemenea, folosite în calorimetria directă. Aceasta nu permite însă măsurarea căldurii de vaporizare a apei și nu oferă date exacte asupra energiei mecanice consumate în paralel, deși echivalența între energia mecanică și cea calorică este cunoscută (kcal = 425 kilogram metri). În plus, înseși condițiile de temperatură și umiditate asigurate de diversele dispozitive și aparate calorimetrice modifică, în multe cazuri, metabolismul energetic. Din aceste considerente, calorimetria directă nu este utilizată în practică și prezintă interes doar teoretic. Mult mai utilă și precisă s-a dovedit a fi calorimetria indirectă, în funcție de intensitatea schimburilor gazoase.

Calorimetria indirectă se adresează consumului de oxigen în condiții metabolice bazale, de repaus fizic și psihic complet, pe nemâncate și la temperatură cât mai apropiată punctului de confort termic (21–22°C). Peste 95% din energia eliberată la nivel celular rezultă din reacțiile oxigenului cu diferitele

substraturi nutritive. Când 1 litru de oxigen este consumat pentru degradarea glucozei, se eliberează 5,01 calorii. În cazul combustionării lipidelor în prezența unui litru de oxigen rezultă 4,7 calorii, iar în cazul proteinelor 4,6 calorii. În medie, cantitatea de energie eliberată pe litru de oxigen utilizat în organism, și denumită echivalent energetic sau coeficient izocaloric al oxigenului, variază între 4,825 și 4,830 de calorii. Folosind acest echivalent energetic, se poate calcula cu precizie energia calorică eliberată de organism în funcție de cantitatea de oxigen consumată în timpul dat. Energia degajată variind direct proporțional cu cantitatea de oxigen consumată, produsul dintre aceasta și coeficientul izocaloric al oxigenului reflectă cheltuielile energetice bazale sau metabolismul bazal.

Determinarea consumului de oxigen se face cu ajutorul aparatelor de metabolism (metabolimetre) în circuit închis sau deschis.

Cu ajutorul spirometrelor de diverse tipuri se poate determina atât consumul de oxigen, cât și bioxidul de carbon eliminat.

Metoda schimburilor gazoase de stabilire a cheltuielilor energetice în funcție de cantitatea de oxigen consumată dă următoarele valori medii ale metabolismului bazal la adultul normal:

la bărbat – 1 600 kcal/24 de ore, ceea ce corespunde la 1 kcal/kg/oră sau 39 kcal/m²/oră;

la femeie – 1 300 kcal/24 de ore, corespunzând la 0,95 kcal/kg/oră sau 34 kcal/m²/oră.

În clinică, exprimarea metabolismului bazal nu se face în valori absolute, ci comparativ cu o valoare ideală, standard, care reprezintă cheltuielile energetice ale unui subiect de aceeași vârstă, sex, greutate și înălțime. Valorile standard au fost stabilite pe baza unor determinări efectuate pe zeci de mii de subiecți. Astfel, metabolismul bazal se exprimă în procente față de valoarea standard. Deviațiile de ±10% sunt considerate normale.

Factorii care afectează cheltuielile energetice bazale sunt: vârsta, sexul, greutatea, înălțimea, starea de repaus sau activitate, tipul și intensitatea efortului, climatul, somnul, febra, malnutriția sau supraalimentația, gravitatea, dereglări endocrine etc.

Nou-născutul are o valoare a metabolismului bazal de 30 kcal/m²/oră. În cursul primului an, cheltuielile energetice ating valoarea maximă de 55 kcal/m²/oră datorită creșterii. Acestea scad apoi, pentru a se stabili între 20 și 40 de ani la valorile adultului. În perioada senescenței, cheltuielile energetice scad la 36–37 kcal/m²/oră. Nevoile energetice zilnice la adultul în repaus variază în jurul a 2 000 kcal, din care 1 650–1 700 kcal pentru întreținerea funcțiilor vitale (circulație, respirație, digestie, excreție) și 200–250 kcal pentru ingestia de alimente, poziția șezând etc. Diversele tipuri de efort cresc cheltuielile energetice direct proporțional cu durata și intensitatea efortului.

Cele mai importante creșteri ale consumului de oxigen le produce însă efortul fizic intens. Energia calorică degajată poate depăși pentru scurt timp de 30–50 de ori valorile bazale ale cheltuielilor energetice.

În timpul somnului, acestea, din contră, scad cu 10–15%, sub valorile normale, ca urmare a reducerii tonusului muscular și activității sistemului nervos simpatic. Temperaturile joase cresc, iar cele ridicate scad metabolismul bazal, cu participarea predominantă a hormonilor tiroidieni. Datorită acestui fapt, cheltuielile energetice sunt cu 10–20% mai joase în zonele tropicale decât în cele reci. Malnutriția scade cu 20–30% metabolismul bazal, iar febra îl crește, ca urmare a intensificării reacțiilor catabolizante energogene. Dintre hormoni, tiroxina, intensificând reacțiile oxido-reductoare celulare, crește metabolismul bazal până la 100% peste valorile normale.

Efecte inverse provoacă deficitul secretor de hormoni tiroidieni. În sfârșit, descărcările simpatico-adrenergice produc prin intermediul adrenalinei și noradrenalinei creșterea ritmului metabolic al procesului de glicogenoliză. Totodată, acestea eliberează mari cantități de energie calorică din celulele bogate în grăsime brună, prevăzută cu capacitatea de a se oxida fără cuplare cu reacțiile de fosforilare oxidativă formatoare de ATP. Astfel, aproape toată energia eliberată devine căldură.

Prin acest mecanism se produce termogeneza fără frison la copilul mic și adaptarea la frig a adultului.

11. FIZIOLOGIA APARATULUI EXCRETOR

Întreținerea vieții și activității celulare reclamă neconștient transformări metabolice locale și generale, necesare în primul rând generării de energie pentru desfășurarea lor, iar, pe de altă parte, pentru *turnover*-ul citoplasmatic. În urma acestor procese metabolice rezultă însă, alături de energia necesară, și o serie de produși intermediari și finali care trebuie îndepărtați din organism. Eliminarea este cerută fie de toxicitatea lor sau de faptul că, acumulându-se în cantitate mare, ar împiedica buna desfășurare a proceselor biologice tisulare.

Îndepărtarea din organism a acestor produși inutili și toxici se realizează prin funcția excretoare a organismului, asigurându-se astfel menținerea constantă a compoziției mediului intern – *homeostazia*. La realizarea ei participă o serie de sisteme funcționale: astfel, la nivelul plămânului se realizează eliminarea CO_2 și a altei serii de substanțe volatile, cum ar fi unii corpi cetonici (acetona) etc. Ficatul, prin intermediul bilei, elimină produșii toxici exogeni sau endogeni, corpi acizi sau bazici. Glandele sudoripare participă, de asemenea, la îndepărtarea produșilor metabolici nefolositori. Cel mai important organ cu funcție excretoare este reprezentat însă de rinichi.

Rinichiul este organul de depurare, de eliminare a substanțelor toxice din organism, indiferent dacă aceste substanțe sunt de origine endogenă sau exogenă. De altfel, principala cale de eliminare a acestora din organism o constituie aparatul uro-excretor și, prin aceasta, rinichiul participă la menținerea constanței mediului intern.

În rezumat, rinichiul îndeplinește următoarele roluri în organism:

- funcția de excreție sau depurare a organismului de substanțe nefolositoare endogene și exogene, cum ar fi: substanțe azotate rezultate din metabolismul intermediar (uree, acid uric, creatinină) și substanțe neazotate (pigmenți biliari, resturi lipidice, resturi glucidice, fosfați, bicarbonați etc.);

- rol în menținerea echilibrului acido-bazic. Când în organism se acumulează baze, acestea sunt tamponate la diverse niveluri sau sunt eliminate prin rinichi, piele, intestin etc. Acizii se acumulează mai frecvent decât bazele, așa încât ei sunt eliminați în special prin intermediul rinichiului. Prin rinichi se elimină cetoacizii și amoniacul pentru a contracara devierea echilibrului acido-bazic;

- rol în menținerea echilibrului hidroelectrolitic. În funcție de eliminarea apei și electroliților prin rinichi, acest echilibru se menține în mare parte constant. La menținerea echilibrului hidroelectrolitic participă și alte organe care acționează prin intermediul rinichiului: hipotalamusul, hipofiza, suprarenala etc.

Prin funcțiile de îndepărtare a produșilor toxici și de menținere a echilibrului apei și electroliților, rinichiul menține constantă compoziția mediului intern;

- funcția endocrină. Rinichiul secretă o serie de substanțe cu proprietăți de hormoni, cum ar fi: renina, prostaglandine, kinine biogene, eritropoietina etc.

11.1. DATE DE MORFOLOGIE FUNCȚIONALĂ A RINICHIIULUI

Rinichiul prezintă pe secțiune trei zone bine deosebite: capsula fibro-conjunctivă, zona corticală și zona medulară. Fără a intra în detalii privind aspectul structural microscopic al acestor zone, vom recapitula doar câteva date privind aspectul morfo-funcțional al organului respectiv (fig. 11.1).

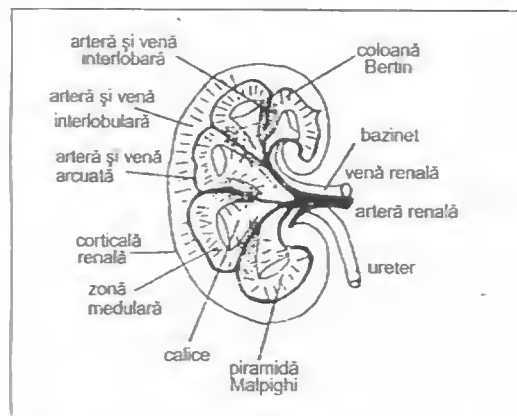


Fig. 11.1. Secțiune frontală prin rinichi.

Unitatea morfologică și funcțională a rinichiului este nefronul. Parenchimul renal este compus din numeroși nefroni, fiecare din aceștia posedând o irigație sanguină proprie. Urina se formează ca urmare a activității acestor nefroni, iar funcția renală, în totalitate, poate fi considerată ca o sumă a funcției exercitate de cele aproximativ 2 milioane de nefroni.

Un nefron este compus din două părți principale: un glomerul și un tub urinifer. Glomerulul, la rândul său, este format din capsula Bowman (extremitatea sferică încbisă a tubului) și dintr-un ghem de capilare.

Glomerulul este subîmpărțit în 3-5 lobuli, formați dintr-un număr de anse capilare tributare aceleiași arteriole aferente și separate printr-un țesut intercapilar, denumit țesut mesangial. Suprafața totală a endoteliului capilarelor este de aproximativ 1,5 m². Este interesant de subliniat faptul că foia internă a capsulei Bowman urmărește ansele capilare de care aderă intim (fig. 11.2). Porțiunea tubulară a nefronului începe la nivelul glomerulului și suferă mai multe curbură în această regiune, mergând în general spre exterior, în cortex. Tubul se îndreaptă apoi și coboară în linie dreaptă spre substanța medulară. Porțiunea sinuoasă și

prima parte a porțiunii descendente constituie tubul proximal, cu o lungime de 14 mm (12-14 mm). Peretele său este format dintr-un epiteliu unistratificat, cu celule în formă de piramidă trunchiată, având un nucleu voluminos așezat în poziție bazală. Caracteristic acestor celule este prezența marginii „în perie” la nivelul polului luminal (fig. 11.3).

În partea terminală a porțiunii descendente, tubul devine extrem de subțire. Această porțiune poartă numele de segmentul subțire al ansei Henle. După o curbură, realizând aspectul în „ac de păr”, tubul urcă îndărăt spre glomerulul său, în corticală, realizând ansa Henle, cu o lungime de 20-22 mm. De-a lungul segmentului ascendent tubul se îngroașă din nou, continuându-se cu o porțiune canaliculată care prezintă câteva sinuozități, pe o lungime de 5 mm, denumită tub distal, și care se

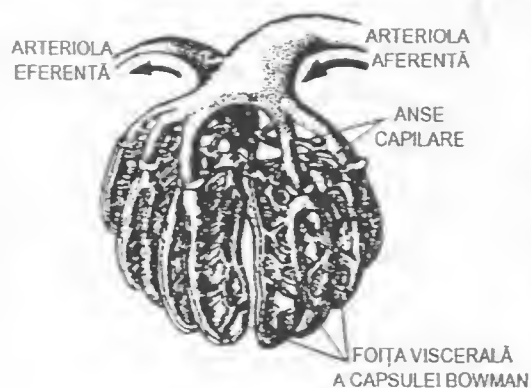
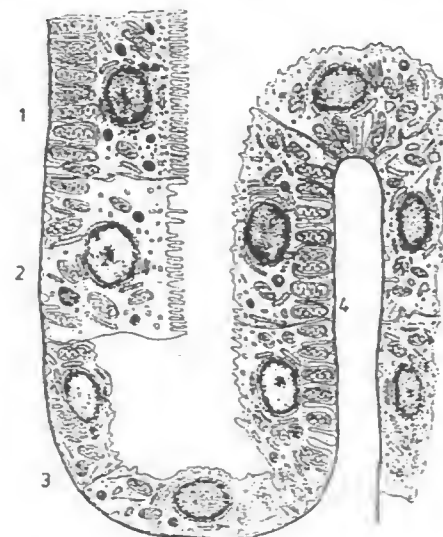


Fig. 11.2. Interrelații între capilarele glomerulare și epitelul capsulei Bowman.

Fig. 11.3. Particularitățile structurale ale celulelor tubului urinifer. (1) tub proximal, (2) ram descendent al ansei Henle; (3) segment subțire al ansei Henle; (4) tub distal; (5) tub colector.



varsă în sistemul canalelor colectoare (20 mm). Aceste canale merg în linie dreaptă prin substanța medulară, colectează conținutul rezultat în urma activității mai multor nefroni și se deschid apoi la nivelul papilelor renale. Peretele tubului contort distal este format, de asemenea, din epiteliu monostratificat, ale cărui celule cilindrice prezintă microvili, fără margine „în perie”. Traiectul său realizează un contact direct cu polul vascular al glomerulului, participând la formarea aparatului juxtaglomerular Goormaghtigh (fig. 11.4).

O privire de ansamblu ne arată că substanța corticală este compusă din glomeruli și din porțiuni sinuoase proximale și distale ale tuburilor, iar substanța medulară este formată din segmentele descendente și ascendente ale tuburilor și din sistemul de canale colectoare. Acest epiteliu se sprijină pe o membrană bazală continuă, mucopolizaharidică, puțin diferențiată la nivelul diferitelor segmente tubulare. Ea însoțește stratul epitelial de-a lungul întregului tub urinifer, fiind în directă legătură proximală cu bazala capsulei Bowman.

Interstițiul renal a depășit sfera preocupărilor anatomo-patologice, semnificăția rolului său funcțional fiind apropiată din ce în ce mai mult de mecanismul formării și concentrării urinei atât în condiții fiziologice, cât și în condiții patologice.

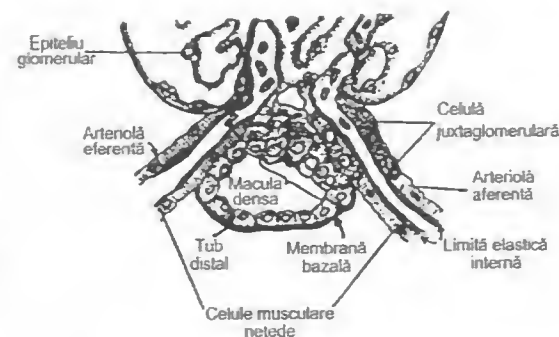


Fig. 11.4. Elementele componente ale aparatului juxtaglomerular Goormaghtigh.

11.1.1. VASCULARIZATIA RINICHIULUI

Arterele reale sunt scurte și iau naștere în unghi drept din aorta abdominală. Ajungând la nivelul hilului renal, artera renală se împarte în mai multe ramuri, din care iau naștere arterele lobare care au traiect de o parte și de alta a piramidelor medulare. La nivelul bazei piramidelor, acestea se arcuiesc, formând arterele în arcadă, din care se desprind, tot sub un unghi de 90° dar în direcții opuse, arterele drepte și arterele interlobulare. Arterele interlobulare se îndreaptă spre regiunea subcapsulară pe care o irigă după ce au aprovizionat cu sânge un mare oumăr de glomeruli pe calea arteriolelor aferente, branșate alternativ de-a lungul întregului traseu.

Arteriola aferentă, după ce se capilarizează, se continuă cu arteriola eferentă, aceasta prezentând un diametru mult mai mic decât prima. După ce părăsește glomerulul, arteriola eferentă se îndreaptă spre porțiunea tubulară a nefronului. Ajungând la oivelul porțiunii proximale a tubului, arteriola eferentă se ramifică într-un grup de capilare (capilarele peritubulare) care se înclădesc în jurul acestuia, continuându-se cu sistemul venos (fig. 11.5).

De remarcat că nici tubii și nici vasele nutritive au suot absolut identice în diversele segmente ale rinichiului. Nefronii, ai căror glomeruli sunt situați în cele 2/3 externe ale corticalei, tind să aibă segmente descendente și ascendențe foarte scurte și oumăi schiță de ansă Henle. Arteriolele eferente ale acestor nefroni sunt foarte scurte, iar ramificațiile peritubulare apar imediat și sunt oumeroase. Nefronii cu glomeruli situați în 1/3 internă a corticalei (juxtamedulari) au o structură deosebită. Aceștia au segmente descendente și ascendente, care pătrund adânc în interiorul piramidelor, tind să se alungească și, în loc să se ramifice iotens în capilare peritubulare, dau naștere la unul sau două vase lungi drepte – vasa recta. Aceste vase urmează traiectul nefronului înăuntrul și în afara piramidelor medulare și nu par să se ramifice în capilare adevărate.

Hemodinamica renală. Regimul circulator al rinichilor se caracterizează prin nnele particularități care-l deosebesc profund de alte viscere, imprimându-i modalități proprii de comportare în coodijii normale și patologice. Astfel, circulația renală este extrem de intensă, debitul sanguin renal variind între 1 000 și 1 300 ml/min în ambii rinichi (25% din debitul cardiac).

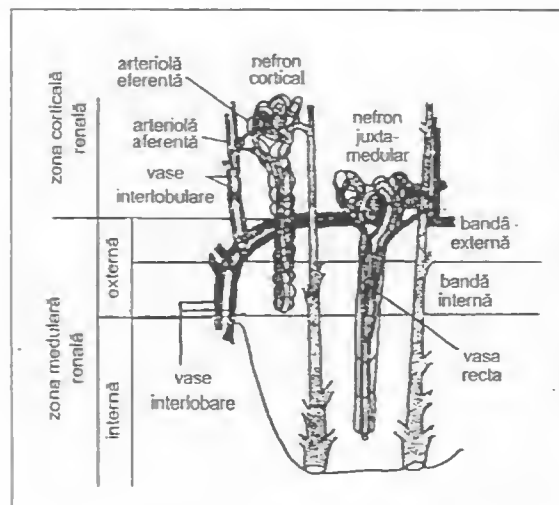


Fig. 11.5. Particularități structurale ale nefronilor corticali și juxtamedulari.

Față de presiunea arterială sistemică, debitul sanguin renal manifestă o independență relativă accentuată, care face ca fluxul saoguin intrarenal să rămână nemodificat la oscilații foarte largi (60–200 mmHg) ale presiunii arteriale sistemice. Explicația ar consta într-o autoreglare a circulației renale. Meoționăm, de asemenea, că hematocritul sângelui iotrareal intervine prin aceea că este cel mai scăzut în comparație cu hematocritul din alte arii vasculare (până la 50% din hematocritul sistemic).

Interesant este și faptul că între regimul circulator al corticalei și medularei renale există mari deosebiri (tabelul 11.1).

TABELUL 11.1

Zonă	Greutate % din rinichi	Timp de circulație intrarenal (secunde)	Volum sanguin ml/100 g rinichi	Debit sanguin	
				ml/100 g rinichi	valoare % din DSR
Corticală	70	0,02	13,5	321	92,5
Medulară externă	20	0,086	3,9	22,4	6,5
Medulară internă	10	0,75	2,2	2,9	1,0

În timp ce în zona corticală renală fluxul sanguin reprezintă 85–90%, din debitul sanguin renal, zona medulară externă primește 10%, iar zona medulară ioternă doar 2% din fluxul sanguin renal.

Circulația sanguioă iotrareală ou este influențată semoificativ de reflexele inițiate din crosa aortică și din sinusul carotidian.

Nu s-au observat modificări semnificative ale fluxului sanguio intrareol după denervarea organului. Simpatetomia, splanhnectomia, anestezia rahidiană, de asemenea, ou modifică debitul sanguio renal.

Autoreglarea hemodinamicii renale. Autoreglarea hemodinamicii reole permite menținerea relativ constantă a presiunii de perfuzie la nivelul glomerulilor și, deci, a cantității filtratului glomerular, io coodijiiile unor variații importante ale presiunii arteriale sistemice.

După cum s-a văzut, rinichiul dispune de un sistem vascular cu particularități deosebite. Pe de o parte, există două rețele de capilare, conectate în serie, iar pe de altă parte, cea de-a doua rețea de capilare prezintă o heterogenitate deosebită. Glomerulul, sistem capilar intercalat între două arteriole cu perete muscular bine reprezentat, este supus unei presiuni hidrostatice de două ori mai mari decât în capilarele circulației sistemice. Fiind însă conectat în paralel față de cele două arteriole, rezistența hidrodynamică de la oivelul său, în condiții oormale, este neglijabilă. Sistemul de capilare de după arteriola eferentă în zona cortexului renal are ponderea cea mai mare. Ele sunt foarte scurte, cu multiple anastomoze și nu ajung până în zona medulară. Aproximativ 20% din numărul total de glomeruli sunt situați io zona juxtamedulară, capilarele lor fiind lungi, fără anastomoze. Ele pătrund adânc în zona medulară, ajungând chiar în vecinătatea papilei renale. Se realizează astfel o formațioue similară ansei Heole.

Experimental, în timpul perfuziei *in vitro*, rinichiul își modifică foarte puțio debitul circulator, iar valorile filtrării glomerulare se modifică oeinsemnat atunci când presiunea de perfuzie variază de la 70 mmHg la 200 mmHg. Sub valoarea de 60–80 mmHg, considerată limită critică, există o condiționare strânsă între presiunea arterială sistemică și fluxul sanguio iotrareal, deci și a cuantumului filtrării glomerulare. În aceste circumstanțe, diureza variază proporțional cu modificările generale și renale ale circulației.

Pentru a înțelege mai clar fenomenul de autoreglare a circulației renale, vom reaminti una din legile hidrodinamicii care studiază curgerea laminară a lichidelor în tuburi cilindrice. Este vorba de legea Hagen-Poiseuille, care precizează că debitul de scurgere este direct proporțional cu gradientul de presiune și raza tubului și invers proporțional cu vâscozitatea lichidului și lungimea tubului:

$$D = \frac{r^4(P_1 - P_2)}{v \times l}$$

în care D = debitul de curgere; r = raza tubului, în cm; $P_1 - P_2$ = gradientul de presiune între capetele tubului (dyn/cm²); v = vâscozitatea lichidului; l = lungimea tubului, în cm.

De remarcat este faptul că această lege poate fi aplicată în hemodinamică dacă se introduc corecțiile necesare pentru exprimarea fenomenului. Fiind vorba de tuburi elastice, trebuie avut în vedere că raza acestora este dependentă de presiunea intravasculară (legea lui Laplace), iar elementele musculare ce se află în structura pereților vasculari prin vasomotie modifică funcția lor elastică. Factorul vâscozitate are o importanță deosebită în cazul circulației renale, așa încât variațiile apărute sunt demne de luat în seamă. Este știut că bemațiile se dispun axial în condițiile curentului laminar, astfel că în vasele mici vâscozitatea este cu mult mai scăzută decât în restul vaselor. Analizând legea lui Poisseuille, se constată că fluxul sanguin renal poate rămâne constant în condițiile variațiilor presiunii sanguine dacă în același timp se modifică proporțional lumenul vascular și (sau) vâscozitatea sângelui. De altfel, cea mai mare importanță în această interrelație o are tonusul vascular, care determină o anumită rezistență în sistem.

Fenomenul de autoreglare a primit explicații diferite din partea diverșilor cercetători care s-au ocupat și se ocupă de acest proces. Un rol deosebit s-a acordat formațiunilor nervoase intrinseci, capabile să realizeze reacții reflexe intrarenale. Formațiunile nervoase extrinseci nu intervin în realizarea fenomenului de autoreglare, întrucât aceasta persistă și după denervarea chirurgicală sau farmacologică a rinichiului.

O altă teorie, „separația celulară”, a incriminat hematocritul renal ca factor responsabil pentru fenomenul de autoreglare.

Unii cercetători au presupus că presiunea din interstițiul renal ar fi capabilă să întrețină acest proces de autoreglare.

Pornind de la faptul că variațiile presiunii sanguine sunt urmate de ușoare fluctuații ale fluxului sanguin renal, s-a emis teoria miogenă. Valabilitatea „fenomenului Bayliss-Starling” a fost evidențiată astfel și la nivelul vaselor sanguine renale, iar papaverina, teofilina și cianurile nu îl abolesc.

O altă teorie incriminează intervenția substanțelor rezultate în urma proceselor metabolice locale pentru menținerea fenomenului de autoreglare a hemodinamicii renale.

În ultimul timp câștigă tot mai multe sufragii concepția după care constanța debitului sanguin și implicit a filtrării glomerulare depinde de autoreglarea primară a reabsorbției sodiului la nivelul tubului renal. Compoziția osmotică a lichidului tubului distal crește sau scade tonusul celulelor juxtaglomerulare de la nivelul arteriolelor aferente, determinând variații de flux sanguin la nivelul capilarelor glomerulare, cu participarea sistemului renină-angiotensină, a prostaglandinelor și kininelor plasmatice etc., ca principali factori umorali de autoreglare locală.

11.1.2. INERVAȚIA RINICHIULUI

Filetele nervoase de natură simpatică provin în cea mai mare parte din plexul solar și numai în mod accesoriu din nervii splanhnici; ele pătrund în rinichi împreună cu arterele renale pe care le însoțesc de-a lungul întregului lor traseu, ultimele ramificații nervoase fiind găsite în pereții arteriolelor aferente și pe suprafața glomerulilor. Nu se cunoaște exact în ce măsură există ramificații nervoase la nivelul mesangliului, în schimb, la nivelul maculei dense s-au evidențiat, în ultimii ani, terminații nervoase amielinice.

Inervația renală are rol, dar nu esențial, în modificările de aport sanguin și, indirect, ale volumului filtrării glomerulare. Rinichiul denervat continuă să formeze urină.

11.2. MECANISMUL DE FORMARE A URINEI

Mecanismul formării de urină a constituit și mai constituie încă obiectul unor puncte de vedere controversate pentru diverși cercetători.

Bowman (1842) a emis prima concepție privind mecanismul de formare a urinei. El a considerat rinichiul ca o glandă excretorie de apă la nivelul glomerulilor și de substanțe solvite la nivelul tubilor. Bowman pune astfel bazele teoriei „filtrare-secreție” privind mecanismul de formare a urinei.

În 1844, Ludwig emite părerea că la nivelul filtrului renal ar trece apa și sărurile, iar la nivelul tubilor s-ar realiza concentrarea sărurilor prin fenomene de reabsorbție. El explică reabsorbția apei și sărurilor prin fenomene pur pasive ce se petrec dinspre urină către sânge. Conform acestei teorii, formarea urinei s-ar reduce la procese pur fizice de filtrare și retrodifuziune.

Diametral opusă concepției lui Ludwig, Heidenhain a emis în 1883 teoria secretorie, care prezintă rinichiul drept veritabile glande de excreție. După acest autor, glomerulul excretă apa și sărurile minerale, iar epiteliul tubilor renali intervine în excreția substanțelor specifice urinei (uree, acid uric, creatinină etc.).

După ipoteza propusă de Cushny (1917), formarea urinei începe cu producerea ultrafiltratului plasmatic (plasmă fără proteine) la nivelul glomerulilor. Tubii uriniferi reabsorb selectiv o serie de substanțe din interiorul lumenului înspre plasma interstițială. Reabsorbția, după părerea lui Cushny, s-ar efectua numai prin procese active. Ulterior, Rehnberg (1926) a completat această teorie, precizând că procesul de reabsorbție se realizează atât prin fenomene active, cât și prin difuziune pasivă.

Introducerea tehnicilor de micropuncție (Richards) a permis colectarea de lichid din diverse porțiuni ale nefronului, făcând posibilă determinarea compoziției sale chimice prin intermediul micrometodelor biochimice. Utilizarea acestor metode de studiu a îmbogățit mult cunoștințele privind mecanismul de formare a urinei. S-a constatat că anumite substanțe care se găsesc în mod obișnuit în ultrafiltratul colectat din capsula Bowman sau ansa Henle nu mai sunt prezente în lichidul colectat de la nivelul tubului distal. Astfel, s-a confirmat concepția de filtrare-reabsorbție. Prezența unor substanțe numai în urina tubilor distali a atras însă atenția asupra unui alt proces, de sens invers reabsorbției. Datele ulterioare, obținute prin utilizarea metodei *clearance*-ului renal, au confirmat definitiv participarea acestui al treilea proces în mecanismul de formare a urinei – secreția tubulară.

11.2.1. FILTRAREA GLOMERULARĂ

În această primă etapă a formării urinei, are loc procesul de ultrafiltrare, întregit de un al doilea proces fizic – difuziunea.

Ultrafiltratul glomerular ajunge în spațiul urinar după ce a traversat, sub influența unor factori pur fizici, peretele pluristratificat al membranei filtrante.

Cercetările electrono-optice au pus în evidență că celulele epiteliului glomerular (podocitele) prezintă numeroase prelungiri, ce înconjură capilarele sub forma unei rețele, care vine în contact cu membrana bazală glomerulară. Prin această dispunere se formează un spațiu labirintic pe care plasma filtrată îl parcurge, ajungând în spațiul urinar după ce a spălat citoplasma celulelor epiteliului glomerular. Se atribuie acestui spațiu calitățile unui burete submicroscopic, care pompează continuu plasma filtrată (fig. 11.6).

Glomerulul prezintă, deci, două părți distincte:

- o regiune de filtrare, formată din membrana filtrantă și care este alcătuită din trei straturi: epiteliu glomerular, membrană bazală și endoteliu capilar;

- o regiune intercapilară sau axială, care conține celulele intercapilare, numite „mesangiale”, înconjurate de substanța fundamentală și membrana bazală axială. Aceste celule au capacitatea de fagocitoză, sensibilitate mare față de stimuli colagenoformatori, precum și asemănare izbitoră cu celulele care fac parte din aparatul juxtaglomerular (celulele lacisului).

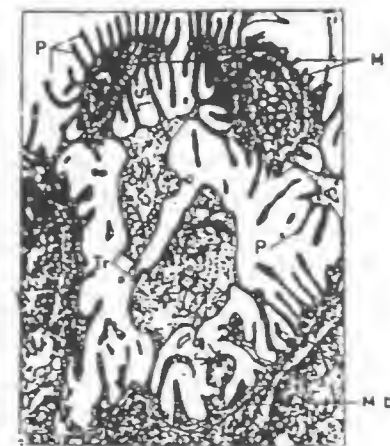


Fig. 11.6. Aspect microscop electronic al unei foaie viscerale din capsula Bowman. Mb, membrană bazală; P, pedicele; Tr, trabecule; SL, spațiu labirintic.

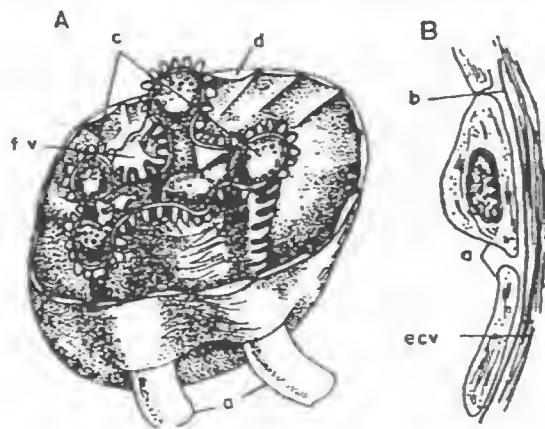


Fig. 11.7. A: Reprezentare grafică a glomerulului renal și a membranei filtrante. a, arteriole, c, capilare, d, foița parietală a capsulei Bowman. fv, foița viscerală. B: Interrelații între peretele capilar și epiteliul visceral al capsulei Bowman. a, endoteliu capilar fenestrat, b, membrană bazală, ecv, epiteliu visceral al capsulei Bowman.

Membrana filtrantă glomerulară. Caracteristicile anatomice și circulația glomerulară lasă să se întrevadă rolul important al factorilor hemodinamici în realizarea ultrafiltrării unei mari cantități de plasmă prin peretele capilarului glomerular. Având proprietăți asemănătoare membranelor poroase artificiale (colodiu, celofan, porțelan etc.), peretele capilarului glomerular se comportă ca o membrană traversată de nenumărați pori. Această concepție este în general admisă, deși natura exactă a porilor și chiar existența lor rămâne ipotetică. Din această cauză se preferă uneori o explicație funcțională, alternativă, după care membrana bazală a capilarelor glomerulare este sau se comportă ca un gel hidratat, care poate fi traversat de apă și cristaloizi, dar prin care moleculele proteice difuzează cu atât mai greu, cu cât au dimensiuni mai mari (fig. 11.7).

Rezultă, deci, că, în momentul de față, concepția unei membrane glomerulare filtrante prevăzute cu pori preformați, deși ipotetică, trebuie păstrată ca instrument de lucru pentru explicarea unor aspecte ale fiziologiei și patologiei filtrării glomerulare.

Dinamica filtrării glomerulare – factorii filtrării glomerulare. Formarea urinei primitive necesită intervenția unor forțe capabile să separe proteinele de apă și substanțele solvite în plasmă și, în același timp, să forțeze faza lichidă să traverseze membrana filtrantă, semipermeabilă. Acestea sunt reprezentate de: presiunea hidrostatică, presiunea coloidosmotică și presiunea intracapsulară.

a) *Presiunea hidrostatică intraglomerulară a sângelui.* Principalul factor care determină filtrarea plasmă la nivelul membranei filtrante este reprezentat de presiunea sângelui din glomerulii renali. Ea este evaluată la aproximativ 60–70% din presiunea arterială sistemică, având o valoare de 70–80 mmHg. Este factorul determinant al filtrării glomerulare, întrucât filtrarea poate fi scăzută și, uneori, chiar sistată atunci când presiunea din aortă scade sub 70 mmHg.

Nu totdeauna însă filtrarea glomerulară încetează atunci când presiunea arterială sistemică scade sub valorile amintite, realizând o presiune intraglomerulară de aproximativ 35–40 mmHg. S-a dedus, astfel, că presiunea hidrostatică a sângelui nu explică numai prin ea însăși producerea ultrafiltrării în toate situațiile, ca, de exemplu, în cursul diurezei osmotice.

b) *Presiunea coloidosmotică din capilarele glomerulare.* Aceasta este conferită de către proteinele plasmatică și este cunoscută sub numele de presiune oncotică, a cărei valoare este de aproximativ 25 mmHg la intrarea în capilarul glomerular. Fiind inferioară presiunii hidrostatice intracapilare, aproximativ 20% din

apa intravasculară ultrafiltrază prin peretele membranei endotelio-capsulare. Pe parcursul capilarului, datorită pierderii de apă, presiunea oncotică începe să crească, astfel că la ieșirea din glomeruli atinge valoarea de 30 mmHg.

c) *Presiunea intracapsulară (intrarenală).* Prezența la exteriorul rinichiului a capsulei de natură conjunctivo-fibroasă, inextensibilă, dublată de existența unei hidrohemodinamici intense, creează în interiorul parenchimului renal o tensiune cunoscută sub numele de presiune intracapsulară sau intrarenală.

Presiunea intracapsulară se echilibrează continuu cu presiunea existentă în căile urinare și capilarele peritubulare, fiind adesea asimilată presiunii din interstițiul renal; ea poate fi măsurată direct și are o valoare medie de 10 mmHg.

Dintre cei trei factori, presiunea intracapsulară este cea mai susceptibilă la variații, atât în condiții fiziologice, cât și în cursul diferitelor stări patologice. Orice bipotensiune mai importantă la nivelul căilor urinare poate determina întreruperea filtrării glomerulare.

Rezultanta interacțiunii dinamice a celor trei forțe care intervin în determinarea procesului fizic al ultrafiltrării desemnează „presiunea eficace de filtrare”, care se poate calcula după formula:

$$p_{ef} = p_g - (p_o + p_c)$$

în care: p_{ef} = presiunea eficace de filtrare; p_g = presiunea hidrostatică intraglomerulară; p_o = presiunea oncotică; p_c = presiunea intrarenală. Dacă introducem valorile cunoscute, obținem:

$$p_{ef} = 70 - (25 + 10) = 35 \text{ mmHg}$$

Deci, presiunea eficace de filtrare variază în limite de 30–40 mmHg.

Filtrarea glomerulară se menține în limite relativ constante. La aceasta concură și factorul fizic, difuziunea, precum și fenomenul dinamic de autoreglare a hemodinamicii intrarenale.

Difuziunea reprezintă un mecanism cu rol important în realizarea filtrării glomerulare, întrucât se poate desfășura chiar și în lipsa unor diferențe de presiune hidrostatică, depinzând exclusiv de gradientul de concentrație a moleculelor aflate de o parte și de alta a membranei filtrante. În ceea ce privește excreția anormală a hemoglobinei, difuziunea intervine cu o pondere de trei ori mai mare comparativ cu filtrarea. În situații când presiunea din căile urinare crește peste o anumită limită, menținerea filtrării glomerulare la valori scăzute se datorește, de asemenea, intervenției difuziunii.

În mod normal, la nivelul celor doi rinichi rezultă prin procesul de ultrafiltrare aproximativ 125–130 ml de urină primară în fiecare minut, ceea ce corespunde unei cantități de 170–180 de litri filtrat glomerular în 24 de ore. Acest volum este extras din cei peste 1 000–1 500 de litri de sânge care trec zilnic prin cei doi rinichi.

Prin ultrafiltrare și difuziune, toate substanțele aflate în mod normal în apa plasmatică apar în aceleași concentrații și în urina primară, cu excepția proteinelor, care ajung în spațiul urinar în cantități foarte mici (30 mg/dl). Identitatea dintre faza apoasă a plasmă și a urinei primare a fost dovedită încă de mult prin probe directe (micropuncții) și indirecte (ligatura vaselor tubulare, utilizarea frigului, toxicelor etc.).

Datorită formării unui ultrafiltrat atât de abundent, mod de lucru neeconomic la prima vedere, întreg lichidul extracelular poate fi zilnic filtrat de 12–16 ori prin glomeruli. Din această cantitate enormă filtrată nu este eliminată la exterior decât o mică parte.

Determinarea valorilor filtrării glomerulare. Până în prezent nu există, în mod practic, metode care să măsoare direct valorile filtratului glomerular. El se determină însă indirect, cu ajutorul metodelor de clearance.

Noțiunea de *clearance* a fost introdusă în fiziologia renală de către Van Slyke, prin aceasta înțelegându-se capacitatea rinichiului de a depura plasma de diversele substanțe ce ajung în filtratul glomerular.

Măsurarea filtrării glomerulare, exprimată în termeni de clearance, definește deci volumul teoretic de plasmă depurat în fiecare minut la nivelul glomerulilor celor doi rinichi. Determinarea filtrării glomerulare se realizează cu ajutorul unor substanțe care trebuie să îndeplinească următoarele proprietăți:

- să treacă liber prin membrana filtrantă;
- să fie biologic inertă;
- să nu se reabsoarbă și să nu se secrete prin tubii uriniferi;
- să nu se metabolizeze sau depoziteze în rinichi sau în restul organismului;

- să nu fie toxice și să nu influențeze funcția renală;
- să poată fi dozate cu precizie în sânge și urină.

Substanța care îndeplinește cel mai bine aceste condiții este inulina, polizaharid vegetal cu greutate moleculară de 5 200.

Clearance-ul inulinei se determină după următoarea formulă:

$$V_p = \frac{C_u \times V_u}{C_p}$$

în care: V_p = volumul de plasmă în ml epurat în timp de un minut; C_u = concentrația urinară a substanței în mg/dl; V_u = volumul de urină în ml/min; C_p = concentrația plasmatică a substanței în mg/dl.

Cantitatea de substanță (X) excretată este egală cu produsul dintre volumul de urină eliminat în unitatea de timp și concentrația sa urinară ($V_u \times C_u$). Deoarece substanța utilizată nu se reabsoarbe și nici nu se excretă, ci se elimină numai prin filtrare, cantitatea de substanță eliminată prin urină va fi egală cu cantitatea de substanță filtrată. Cantitatea de substanță filtrată poate fi calculată prin înmulțirea concentrației substanței de filtrat cu volumul filtratului glomerular ($V_p \times C_p$). Dar, concentrația substanței în filtrat este egală cu cea din plasmă. Deci, $V_p \times C_p = V_u \times C_u$, de unde $V_p = \frac{V_u \times C_u}{C_p}$ = volumul de plasmă epurat, adică volumul filtratului glomerular.

Deși este menținută în limite aproximativ constante, de 125–130 ml/min, filtrarea glomerulară poate fi influențată de diverși factori:

a) constricția arteriolei aferente scade fluxul sanguin la nivelul glomerulilor și presiunea intraglomerulară, reducând cantitatea de filtrat glomerular. Din contră, dilatarea arteriolei aferente crește presiunea intraglomerulară și, respectiv, sporește cantitatea de filtrat glomerular format;

b) constricția arteriolei eferente, din contră, crește rezistența la scurgere a sângelui prin glomerul și presiunea intraglomerulară, mărind volumul filtratului glomerular.

Cu totul deosebită este situația când constricția arteriolei eferente este puternică și de lungă durată. În acest caz, fluxul sângelui la nivelul glomerulilor începe să scadă, așa încât plasma rămâne pentru o mai lungă perioadă de timp în capilarele glomerulare și o mai mare parte din apa plasmatică scapă la acest nivel în capsulă. În același timp, însă, presiunea coloidosmotică a plasmelor crește excesiv, determinând o scădere paradoxală a filtrării glomerulare în ciuda unei presiuni glomerulare crescute;

c) stimularea moderată a fibrelor nervoase simpatice de la nivelul rinichiului produce o constricție proporțională atât a arteriolei aferente, cât și a celei eferente, fără modificări ale filtrării glomerulare. Excitarea cu o intensitate mare a aceluiași fibre induce un efect diferit, deoarece constricția arteriolei aferente este mai puternică decât a arteriolei eferente, așa încât cantitatea de lichid filtrat la nivelul glomerulilor se reduce;

d) variațiile în plus sau în minus ale presiunii arteriale sistemice, chiar în limitele de acțiune ale fenomenului de autoreglare, se însoțesc de modificări pasagere corespunzătoare ale volumului de filtrat glomerular. Dimpotrivă, creșterea presiunii arteriale peste valoarea de 200 mmHg determină o sporire proporțională a volumului filtratului glomerular și, implicit, a cantității de urină eliminată, iar scăderi presiunale la valori de 35–40 mmHg se însoțesc de blocarea procesului de filtrare glomerulară;

e) creșterea sau scăderea concentrației proteinelor plasmatiche determină modificări ale volumului filtratului glomerular, prin modificarea presiunii coloidosmotice. O presiune coloidosmotică ridicată determină scăderea cantității filtratului glomerular și, din contră, reducerea presiunii coloidosmotice produce creșterea filtrării glomerulare. Astfel, după ingestia unei cantități mari de apă, lichidele organismului prezintă un anumit grad de diluție și, deci, scăderea presiunii coloidosmotice. La rândul său, reducerea presiunii coloidosmotice cu 2–3 mmHg este urmată de creșterea cu până la 15–20%, a volumului filtratului glomerular;

f) starea membranei filtrante: creșterea permeabilității membranei filtrante, așa cum se întâmplă în timpul efortului fizic sau al sarcinii, este urmată de trecerea în urină a unor proteine cu greutatea moleculară mai mare de 70 000. Printr-un mecanism similar, glomerulonefritele, nefrozele, sclerozele renale determină variații ale volumului de filtrat glomerular.

Scăderea capacității de filtrare a glomerulilor duce la tulburări grave în organism, cum ar fi: acumularea de apă și electroliți, fenomen cunoscut sub numele de sindrom de hiperhidratare. Anumite afecțiuni ca: ocluzia intestinală, diareile profuze, fistulele digestive, diverse tulburări hidroelectrolitice, prin deshidratarea organismului, au drept consecință, de asemenea, scăderea volumului de filtrat glomerular.

11.2.2. FUNCȚIILE TUBULARE

Urina primară, rezultat al ultrafiltrării plasmelor sanguine la nivelul glomerulilor renali, trece de la nivelul capsulei Bowman în sistemul tubular. Primul segment în care ajunge ultrafiltratul glomerular este tubul contort proximal. La acest nivel, urina primară este izotonă cu plasma. Străbătând apoi traiecul ramului descendent al ansei Henle ajunge la capătul distal al acesteia sub formă de urină hipertonică. În continuare, urina urmează porțiunea ascendentă sau segmentul gros al ansei și tubul distal. În acest teritriu, urina devine din nou izotonă, pentru că în tubul colector lichidul tubular să fie hipoton sau hipertonic, în funcție de starea de hidratare a organismului în momentul respectiv. De remarcat că pe acest parcurs unele elemente componente ale ultrafiltratului glomerular dispar complet; este cazul glucozei, aminoacizilor, ionilor de bicarbonat etc., iar altele își ajustează concentrația lor urinară în funcție de necesitățile organismului.

În același timp, cantitatea filtratului glomerular se reduce foarte mult, așa încât volumul de urină eliminată din vezică este doar de 1 200–1 500 ml/24 de ore. Din cele relatate anterior, în fiziologia renală tubul intervine prin două funcții majore:

- de economisire a substanțelor care au fost antrenate în cantități enorme prin filtrare glomerulară, dar care sunt necesare organismului. Acest proces de economisire a căpătat numele de reabsorbție tubulară;
- de completare a procesului de depurare a organismului, început la nivelul glomerulului. Această funcție joacă rol nu numai de eliminare a substanțelor străine, ci și a unui grup restrâns de substanțe endogene care se cer mai rapid eliminate decât o poate face însuși abundentul filtrat glomerular. Este vorba despre secreția (excreția) tubulară.

Reabsorbția tubulară. Reabsorbția tubulară este procesul de trecere a unor constituenți din urina primară în torrentul sanguin prin fenomene de transport pasiv și activ.

Din cantitatea enormă de ultrafiltrat glomerular cu conținut aproape identic cu al plasmelor sanguine se reabsorb 99% la nivelul diverselor porțiuni ale tubilor urinoiferi.

Cea mai mare parte a reabsorbției are loc la nivelul tubilor proximali, reprezentând 80% din întregul proces. Reabsorbția proximală reprezintă reabsorbția obligatorie, restul de 19% se petrece la nivelul tubilor distali și reprezintă reabsorbția facultativă. Procesele de reabsorbție prezintă mari fluctuații în segmentul distal al tubului, fiind dependente de numeroși factori umorali, dar îndeosebi hormonalii, și, pentru acest motiv, ea a fost catalogată drept facultativă, desfășurându-se în funcție de necesitățile organismului. La nivelul tubilor proximali se reabsorb în întregime: glucoza, mari cantități de apă (85%), Na^+ și cationii în general, acizii aminați (98%), Cl^- (99%), HCO_3^- (80%), PO_4^{3-} (95%), K^+ (100%), ureea (60%) etc. În ceea ce privește nivelul tubular la care are loc reabsorbția, acesta diferă de la substanță la substanță. În același timp, există variații cantitative ale reabsorbției diverselor substanțe (fig. 11.8).

Excreția și secreția tubulară. Aceste procese sunt mult mai importante la animalele inferioare și, mai ales, la acelea care nu prezintă glomeruli (aglomerulate). La om este reprezentată de trecerea din torrentul sanguin al vaselor peritubulare în lumenul tubular a unor ioni (H^+ , K^+) a ureei, amoniacului, acidului hipuric sau a unor substanțe toxice, medicamentoase, care au ajuns în organism în mod accidental sau incidental.

De remarcat că, deși prezent în aceeași proporție în ultrafiltratul glomerular ca și în plasmă, ionul de potasiu este eliminat în urina finală datorită excreției sale la nivelul tubului distal. Ureea ultrafiltrată este în mare parte reabsorbită, dar ea apare într-o concentrație mult sporită în urina finală.

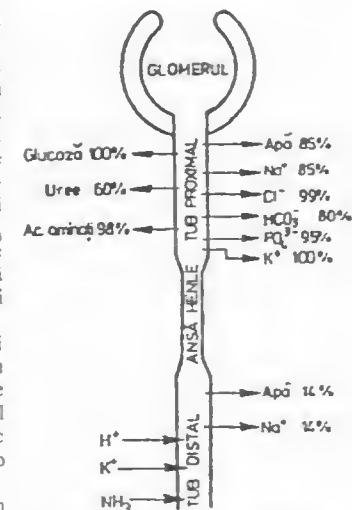


Fig. 11.8. Desfășurarea procentuală a procesului de reabsorbție la nivelul diverselor segmente ale tubului urinoifer.

Prin procesul de excreție-secreție se realizează îndepărtarea principalilor produși toxici din plasmă. Gradul de purificare a plasmăi poate fi urmărit, de asemenea, prin intermediul coeficientului de depurajie plasmatică (*clearance*) a unor substanțe care sunt prelucrate în acest mod.

Rolul tubului proximal. Principalele funcții ale tubului proximal sunt:

- a) reabsorbția celei mai mari părți din apa și substanțele solvite, filtrate la nivel glomerular;
- b) reabsorbția prin endocitoză a cantităților reduse de proteine care au traversat membrana glomerulară;
- c) favorizarea eliminării de produși finali de catabolism fie prin limitarea reabsorbției lor tubulare (ureea și acidul uric), fie prin procesul de secreție (acidul uric, acizi și baze organice endogene);
- d) începerea procesului de acidifiere a urinei, sinteza și secreția de amoniac, participând astfel la excreția produșilor acizi de metabolism;
- e) secreția unor medicamente introduse în organism;
- f) sinteza principalului metabolit activ al vitaminei D (1,25-dihidroxicalciferol) din 25-hidroxicalciferol de origine hepatică.

Aceste activități, care se desfășoară la nivelul tubului proximal, sunt modulate în principal de factori intraluminali și peritubulari.

Factorii intraluminali. Creșterea debitului masic al substanțelor dizolvate ca rezultat al creșterii fie a debitului tubular, fie a concentrației acestor substanțe antrenează o creștere a reabsorbției proximale. Această ajustare a reabsorbției proximale la debitul masic pare să fie explicat în mod esențial prin creșterea concentrației medii a substanțelor în momentul în care debitul crește.

In vivo, reabsorbția proximală variază direct proporțional cu debitul de filtrare glomerulară, atât pentru apă, cât și pentru cea mai mare parte a substanțelor solvite. Există, deci, un „echilibru glomerulo-tubular” exprimat pentru o substanță dată prin constanța raportului între cantitatea de substanță reabsorbită la nivelul tubului și cantitatea filtrată. Echilibrul glomerular funcționează în vederea limitării aportului de apă și substanțe solvite către porțiunea distală a nefronului, a cărui capacitate de transport este limitată.

Creșterea debitului tubular proximal influențează în aceeași măsură și secreția anumitor substanțe. Este cazul amoniacului, al cărui debit de difuziune din celulă în urină crește direct proporțional cu creșterea debitului urinar tubular și, în acest mod, se neutralizează o cantitate mai mare de H^+ secretați de celulele tubulare, întrucât amoniacul se transformă cu ușurință în radical amoniu (NH_4^+).

Factorii fizici peritubulari. Lichidul tubular (apa și elementele solvite), odată trecut din lumen în interstițiul peritubular, trebuie să intre în capilarul peritubular traversând endoteliul acestuia. Această a doua etapă se realizează prin intermediul factorilor fizici; diferența de presiune hidrostatică, coloidosmotică și, în mod accesoriu, datorită particularităților de permeabilitate pentru proteine ale capilarelor peritubulare. Rezultanta interacțiunii acestor factori este de 15–20 mmHg în direcția interstițiu-lumen capilar, realizând astfel trecerea apei și a elementelor solvite în capilar. Este lesne de înțeles că variații ale factorilor sus-menționați vor putea să modifice și reabsorbția tubulară proximală.

În acest caz, sunt posibile două mecanisme. Unul dintre acestea, denumit generic „back-leak” (scurgere îndărăt), ar fi responsabil de creșterea presiunii în spațiul intercelular limitat de membrana bazală și membranele latero-bazale dintre două celule (fig. 11.9). Acest fenomen poate să se dezvolte fie printr-o creștere a presiunii hidrostatice sau diminuarea presiunii coloidosmotice a sângelui din capilarele peritubulare. Creșterea presiunii în spațiul intercelular ar disocia joncțiunile strânse facilitând astfel retrodifuziunea lichidului reabsorbit (apă și substanțe solvite) în lumenul tubular. Procesul de „back-leak” ar avea ca rezultat o diminuare a reabsorbției nete la nivelul tubului proximal.

Cercetări recente par să demonstreze existența unui flux net de apă transcelular și mai puțin sau deloc prin joncțiunile intercelulare. Se pare că o creștere a presiunii hidrostatice ar crește permeabilitatea joncțiunilor intercelulare pentru solviți (fig. 11.10). În acest caz, deplasarea solvenților s-ar face conform gradientelor de concentrație. În cazul anionului bicarbonic, aminoacizilor, glucozei, pentru care gradientul favorizează retrodifuziunea, s-a pus în evidență un flux pasiv de retrodifuziune a acestor substanțe. Dimpotrivă, în cazul clorului, pentru care gradientul favorizează reabsorbția, creșterea presiunii hidrostatice ar trebui să crească procesul de reabsorbție. În același timp, s-a demonstrat că o diminuare a concentrației protidelor peritubulare, deci și a presiunii coloidosmotice, diminuează reabsorbția activă transcelulară a NaCl.

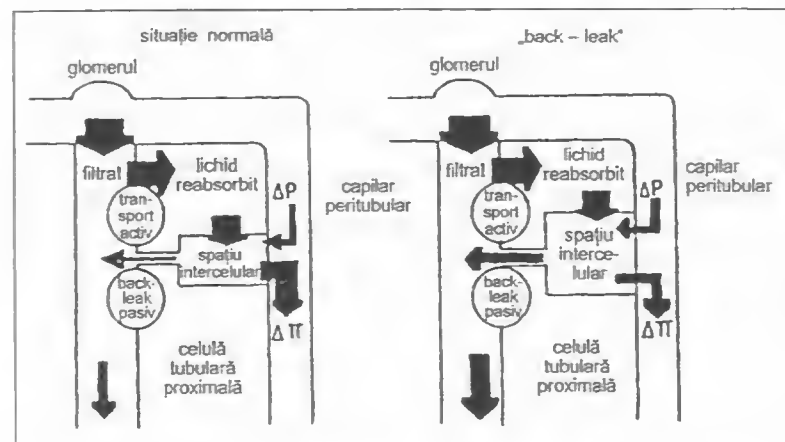


Fig. 11.9. Efectele factorilor peritubulari în procesul de reabsorbție la nivelul tubului proximal (ipoteza „back-leak”). ΔP , diferență de presiune. $\Delta \pi$, diferență osmotică.

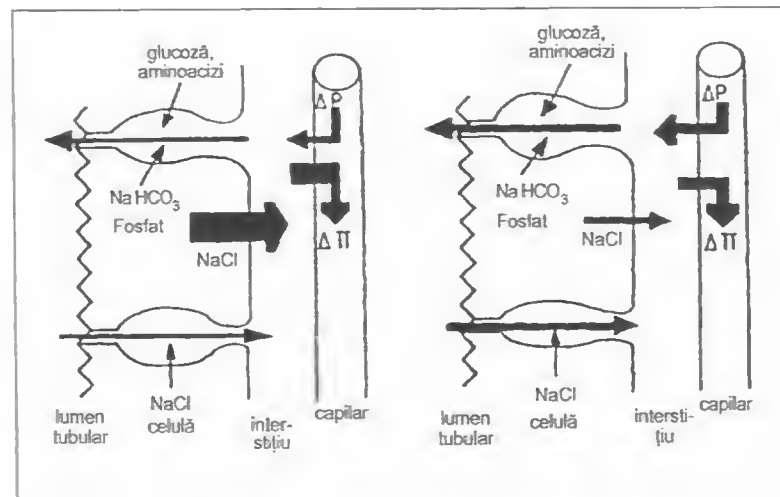


Fig. 11.10. Nouă ipoteză privind intervenția factorilor peritubulari în procesul de reabsorbție proximală. ΔP , diferență de presiune. $\Delta \pi$, diferență osmotică.

În acest mod, creșterea presiunii hidrostatice și scăderea presiunii coloidosmotice, care apar în condițiile expansiunii acute a volumului extracelular, determină în ansamblu o scădere a reabsorbției solviilor și, consecutiv, o diminuare a reabsorbției transcelulare a apei. O situație opusă apare în cazul în care crește rata filtrării glomerulare, determinând și creșterea reabsorbției proximale.

Rolul tubului distal. Tubul distal, care se întinde între ansa Henle și canalul colector cortical, reprezintă o formațiune heterogenă din punct de vedere funcțional. Astfel, în prima parte a sa are loc reabsorbția activă a sodiului și calciului.

Următoarele porțiuni au celule cu proprietăți funcționale diferite. Celulele principale se caracterizează prin procese de reabsorbție a Na^+ și secreție de K^+ ce depind de activitatea Na^+ , K^+ -ATPazei, care funcționează la nivelul polului bazal al celulei. Alte celule, numite intercalare, sunt specializate fie în secreția de H^+ , fie de HCO_3^- . În acest sector, hormonul anti-diuretic crește permeabilitatea pentru apă, iar aldosteronul crește activitatea pompelor de Na^+ , K^+ și a secreției de H^+ , în timp ce la nivelul polului luminal al celulei crește permeabilitatea membranelor pentru Na^+ și K^+ .

Rolul tubului colector. Canalul colector prezintă, de asemenea, o mare variabilitate funcțională de la o zonă la alta.

În porțiunea sa corticală se petrec aceleași procese descrise pentru segmentele terminale ale tubului distal.

Segmentul care traversează zona medulară externă se caracterizează prin procese de secreție activă a ionilor de H^+ . În acest sector se formează NH_4^+ și fosfat acid, în schimb diminuează schimburile active de Na^+ și K^+ , pentru a face loc schimburilor pasive în sens invers. În această parte a tubului contort, aldosteronul nu mai are efect decât asupra secreției ionilor de hidrogen.

În partea inițială a tubului colector care traversează zona medulară internă, hormonul anti-diuretic are acțiunea maximă asupra permeabilității pentru apă și mai puțin pentru uree, producându-se o reabsorbție proporțională de apă și concentrarea ureei, în timp ce, în ultima porțiune (papilă), permeabilitatea peretelui tubular pentru uree este controlată de către hormonul anti-diuretic. Celulele principale din structura tubului colector care traversează zona medulară internă desăvârșesc procesul de reabsorbție a Na^+ și de acidifiere a urinei, al cărei pH poate să scadă până la valori de 5.

11.2.2.1. Mecanismul transporturilor tubulare renale

Reabsorbția și secreția tubulară a majorității substanțelor se realizează prin procese de aceeași natură, dar care diferă între ele numai prin direcția în care se efectuează schimbul de substanțe. Caracterul activ sau pasiv al transportului este discutat atât pentru reabsorbția, cât și pentru secreția tubulară. Reabsorbția și secreția activă presupun existența unor mecanisme enzimatice, capabile să preia și să transporte din, sau înspre lumenul tubular diferite substanțe organice sau minerale împotriva gradientelor de concentrație sau electro-chimice.

De multe ori, același mecanism enzimatic asigură transportul mai multor constituenți, de obicei înrudiți, din filtratul glomerular. Dar și în cazul unor mecanisme de transport mai strict specializate există numeroase verigi enzimatice comune sau puncte de interferență ale acestora, care implică o concurență a mai multor substanțe pentru folosirea aceluiași lanț enzimatic. În acest sens, așa-numita inhibiție competitivă se poate manifesta între substanțe având în mod normal un transport în același sens sau în sens invers. Din acest motiv, se observă că diferitele substanțe traversează peretele tubular în manieră diferită.

Mărimea reabsorbției și secreției active poate fi limitată cantitativ de un anumit plafon, care ține de existența unei capacități maxime de transfer la nivelul celulelor tubulare. Astfel, reabsorbția glucozei, fosfatului, acidului uric, acidului ascorbic și a unor aminoacizi, ca, de altfel, și secreția acizilor organici slabi și a bazelor organice puternice se realizează printr-un mecanism de transport activ limitat la o anumită capacitate de transport enzimatic — T_m (transport maxim).

În cazul altor substanțe, procesul de reabsorbție sau secreție activă nu depinde de saturarea unor mecanisme enzimatice de transport, ci de mărimea gradientului de concentrație care există între polul luminal și cel capilar al celulei tubulare. Pe de altă parte, acest tip de transport depinde de timpul de contact al ultrafiltratului cu epitelul tubular. Reabsorbția sodiului și bicarbonatului, ca și secreția potasiului și a ionilor de hidrogen se realizează prin mecanisme de acest tip.

Ambele modalități de transfer discutate anterior se produc cu cheltuielă de energie, sunt, deci, forme ale transportului activ.

În afara transportului activ, există un alt tip de mecanism de transport, numit, deoarece nu cere cheltuielă energetică, transport pasiv, și care se realizează prin simplă difuziune. Procesul ascultă de legi pur fizice (gradiente osmotice, de concentrație, electrice etc.) și presupune o mare difuzibilitate a substanței în cauză prin membrana celulară.

Prin acest mecanism se reabsorb ureea, apa și se secretă NH_4^+ și roșu neutru etc.

Noțiunea de T_m se aplică atât reabsorbției, cât și secreției tubulare active.

La concentrații plasmatice mici ale glucozei și acidului paraaminohipuric (PAH), ca prototipuri de substanțe transportate activ prin T_m , cantitățile prezentate tubilor renali sunt în întregime reabsorbite și, respectiv, secretate. Pe măsură ce concentrațiile plasmatice ale celor două substanțe cresc, crește și cantitatea care ajunge la nivelul tubilor renali (încărcarea tubulară); ele vor fi însă reabsorbite, respectiv, secretate în totalitate, atât timp cât încărcarea tubulară nu depășește capacitatea enzimatică de transport a celulelor tubulare. Din momentul în care această capacitate de transport a fost depășită, glucoza apare în urină, iar secreția PAH scade față de nivelul concentrației în plasmă.

Prin definiție, deci, un maxim al transportului poate fi atins numai atunci când celulele tubulare se pot afla în prezența unor cantități de substanțe mai mari decât acelea pe care le pot transporta.

Mecanismul reabsorbției glucozei. Cantitatea de glucoză din sânge (glicemia) se menține prin mecanisme nervoase și umorale la valori relativ constante și este în jur de 1 g/l. În aceste condiții, așa cum am mai arătat, glucoza filtrată la nivelul glomerulilor este în totalitate reabsorbită pe parcursul primei ureimi a tubului proximal, așa încât, în mod normal, ea nu apare deloc în urina finală.

Mecanismul reabsorbției glucozei este relativ bine cunoscut. Într-un prim moment, hexokinaza bogat reprezentată în membrana celulară a tubului proximal transformă glucoza în glucoză 6-fosfat. Într-o a doua etapă, sub acțiunea glucozo-6-fosfatazei, esterul fosforic al glucozei pune în libertate glucoza, care difuzează prin celula tubulară și este retrimisă în circulație. Un argument în favoarea acestei păreri este și faptul că flurizina inhibă reabsorbția glucozei. Se știe că flurizina blochează fosforilarea și, astfel, produce glucosurie, sindrom realizat în cursul diabetului renal.

În mod normal, până la concentrații de 1,7–1,8 g/l, glucoza este în întregime reabsorbită la nivelul tubului proximal. Peste aceste valori ale glicemiei, în urină apar cantități mici de glucoză. De altfel, în momentul apariției glucosuriei există o încărcare tubulară egală cu 220–250 mg/min. Întrucât se pare că o parte din nefroni au o capacitate de transport mai crescută, reabsorbția glucozei filtrate continuă să se producă din ce în ce mai mult pe măsură ce cresc valorile glicemiei. Capacitatea de reabsorbție a tuturor nefronilor este depășită atunci când încărcarea tubulară ajunge la 350–400 mg/min. Pentru orice creștere ulterioară a valorilor glicemiei, excreția urinară a glucozei crește paralel cu cantitatea filtrată (fig. 11.11).

Din figură se observă că glucoza filtrată crește proporțional cu creșterea concentrației ei plasmatice — dreapta ce trece prin origine. De asemenea, se poate observa că în urină apare glucoza numai după ce concentrația sa plasmatică depășește 1,8 mg/dl.

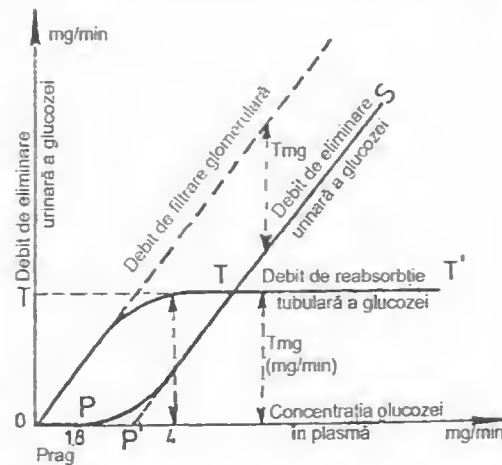


Fig. 11.11. Dinamica filtrării și reabsorbției glucozei la nivelul rinichului. P, limita reabsorbției maxime a glucozei (transport maxim). T_m , transportul maxim în mg.

Spre deosebire de reabsorbția proximală, transportul activ al sodiului la nivelul tubului distal se află sub dependența hormonală. Aldosteronul controlează această reabsorbție, favorizând pătrunderea sodiului în mediu intracelular printr-o acțiune permisivă a proteinelor sintetizate în celula tubulară: această permează ar facilita intrarea apicală a sodiului. O altă posibilitate de acțiune s-ar realiza prin stimularea lanșurilor enzimatiche care participă la producerea unor componenți ai sistemului macroergic care aprovizionează pompa de sodiu. În sfârșit, reabsorbția distală s-ar realiza printr-o activare a pompei de sodiu sau prin formarea unei pompe noi de sodiu. Această nouă enzimă este tot o ATPază, Na^+ , K^+ -dependentă, dar, de data aceasta, acțiunea ei s-ar manifesta la nivelul polului bazal al celulei tubulare.

Activitatea pompelor s-ar desfășura în sensul unei funcționări cuplate, având drept rezultat o reabsorbție activă a sodiului, realizată printr-un schimb ionic. Pentru fiecare ion de sodiu reabsorbit, celula tubulară elimină în lumen un ion de hidrogen sau un ion de potasiu. O altă caracteristică a reabsorbției distale a sodiului este și aceea că datorită ei se ajustează cantitatea de Na eliminată la exterior prin intermediul urinei. Deci, reabsorbția distală este în funcție de necesitățile de eliminare sau conservare a Na^+ în organism. Modul în care se desfășoară această reabsorbție evidențiază, în același timp, și influența pe care o exercită asupra transportului de Na timpul de contact al lichidului tubular cu epiteliul tubului distal. Dacă fluxul urinar din acest segment este mult crescut, se va scurta corespunzător și timpul aflat la dispoziția lichidului tubular pentru realizarea schimburilor ionice. În acest caz, deși osmolaritatea urinei va fi scăzută, cantitatea de sodiu eliminat prin urină va crește. Rezultatul respectiv se obține indiferent de mecanismul creșterii vitezei de circulație a lichidului tubular (diureza osmotică sau apoasă etc).

Transportul activ al sodiului în regiunea distală a nefronului reprezintă, în același timp, unul din mecanismele principale prin care se realizează și mențin diferențele de osmolaritate între diferitele regiuni ale rinichiului. Acest gradient osmotic este absolut necesar mecanismului de concentrare și diluție a urinei. În procesul de transport al Na prin tubi către plasma sanguină intervine și renina prin octapeptidul activ – angiotensina II, care își realizează efectele atât prin mecanism direct celular, cât și indirect, prin modificări de hemodinamică (fig. 11.16).

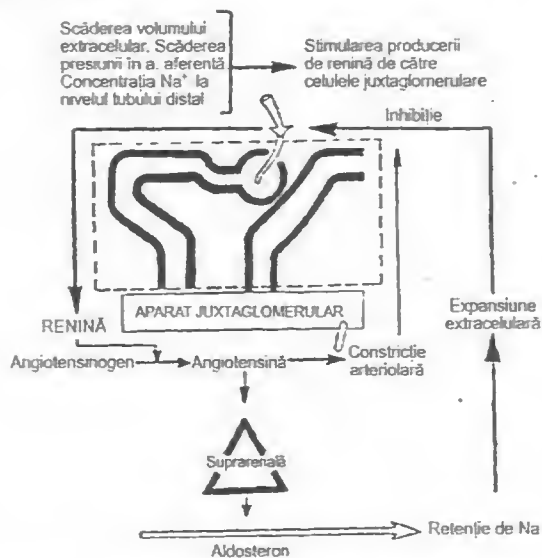


Fig. 11.16. Participarea sistemului renină-angiotensină la procesul de reabsorbție a Na^+ la nivelul tubului distal.

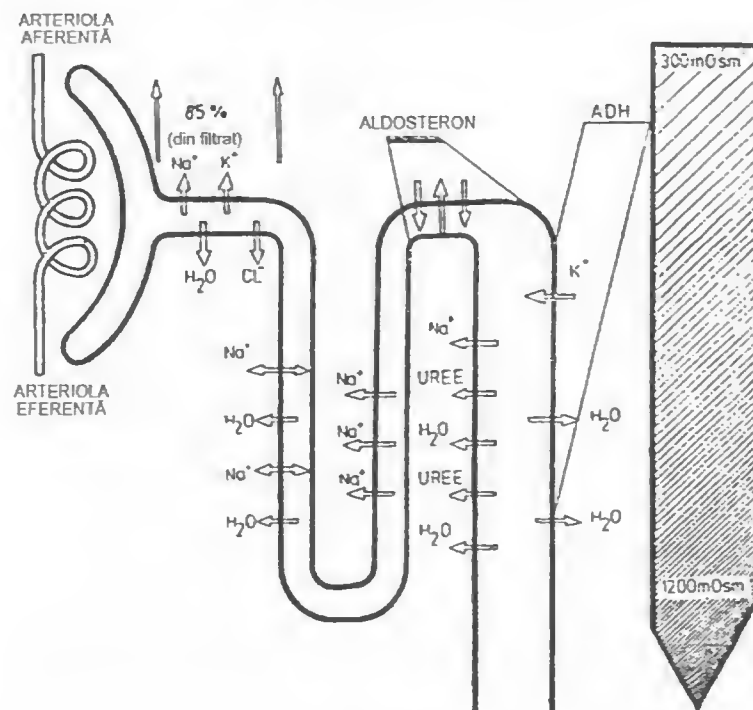


Fig. 11.17. Etapele de reabsorbție a apei, sodiului, potasiului și ureei de-a lungul tubului urinar.

Reabsorbția apei. Dacă apa se filtrează integral și fără intervenția unor mecanisme particulare la nivelul glomerulului și numai în funcție de anumiți parametri fizici obligatorii, procesul de prelucrare pe care îl suportă urina primitivă de-a lungul segmentelor tubulare este mult mai complex (fig. 11.17).

În concepția lui Smith (1951), acceptată în parte și astăzi, în segmentul tubular proximal reabsorbția activă de sodiu este urmată de o retroreabsorbție pasivă (80%), dar obligatorie, a apei, care afectează 7/8 din apa filtrată. La nivelul ansei Henle se reabsorb 6% din cantitatea de apă filtrată. Se pare că reabsorbția apei se face numai la nivelul segmentului descendent al ansei. În schimb, la nivelul tubului contort distal, 9% din apa filtrată se reabsorb, iar în tubul colector 4%. Reabsorbția apei la nivelul tubului contort distal și al tubilor colectori se face în prezența ADH.

Transportul ionului de potasiu prin epiteliul tubular. Filtrat în concentrație echivalentă cu valoarea sa din plasmă, 4 mEq/l, ionul de potasiu este excretat prin urină doar în cantitate de aproximativ 15% din valoarea sa filtrată. Dacă însă se administrează unui subiect săruri de potasiu în cantitate crescută sau dacă secreția ionilor de hidrogen este inhibată, ionul de potasiu se elimină mult mai mult, ajungând până la o valoare de aproximativ două ori față de fluxul de filtrare. Aceste observații scot în evidență clar existența, alături de fenomenele de reabsorbție, și a procesului de secreție a acestui ion de-a lungul tubului urinar (fig. 11.18).

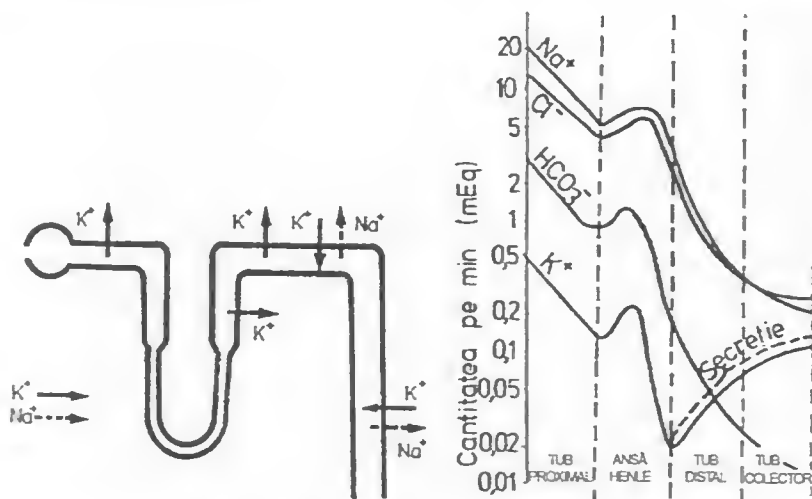


Fig. 11.18. Bilanțul ionului de potasiu la nivelul rinichiului.

Procese de reabsorbție a ionilor de potasiu au loc cu precădere la oivelul tubului contort proximal. Trecerea K^+ din urina primară prin epiteliul proximal se realizează prin fenomene de transport activ, întrucât, chiar atunci când concentrația potasiului este scăzută, acest ion este reabsorbit datorită unei forțe electrice furnizate de negativitatea relativă a lumenului tubular față de lichidul interstițial peritubular. Acest proces de reabsorbție continuă și după trecerea de tubul contort proximal deoarece în tubul distal ajunge o mică fracțiune de K^+ filtrat (fig. 11.19).

La nivelul tubului contort distal, ionul de potasiu este în general secretat în urină la schimb cu ionii de sodiu. Acest proces continuă și în tubul colector, fiind rezultatul unui gradient electric ridicat, cu negativitatea în lumenul tubular, realizat de reabsorbția activă a Na^+ . Acest gradient electric determină ionii de potasiu să difuzeze în urină prin membrana celulei distale, care prezintă o mare permeabilitate pentru ionul respectiv. Singura forță care se opune este însă transportul activ de K^+ din lumenul tubular. Cantitatea de potasiu secretat de-a lungul porțiunii distale a nefronului este în funcție de balanța dintre aceste două procese. Dacă rezerva de sodiu este reabsorbită înainte de capătul nefronului, forța generată prin transportul Na^+ scade și atunci K^+ este preluat din urină în cantități foarte mari, chiar și la acest nivel.

Eliminarea K^+ la nivelul rinichiului depinde astfel de mai mulți factori:

- concentrația intracelulară a K^+ și, în mod particular, în celulele tubului renal. Eliminarea sa este, în schimb, foarte puțin influențată de nivelul potasemiei;
- cantitatea de sodiu ce trebuie reabsorbită;
- necesitățile de excreție a ionilor de hidrogen de către tubii renali. Secreția de H^+ tinde să reducă eliminarea K^+ prin reducerea gradientului creat de reabsorbția Na^+ ;
- capacitatea mecanismelor de schimb. Am arătat că reabsorbția activă a Na^+ la oivelul tubului distal este controlată de mineralocorticoizi. Existența unei secreții adecvate de aldosteron de către corticosuprarenală întreține acest mecanism de transport;
- toleranța pentru ionul de potasiu. Deși mecanismul prin care se realizează ou este clar, se cunoaște observația că excreția potasiului este facilitată prin administrarea repetată a acestui ion.

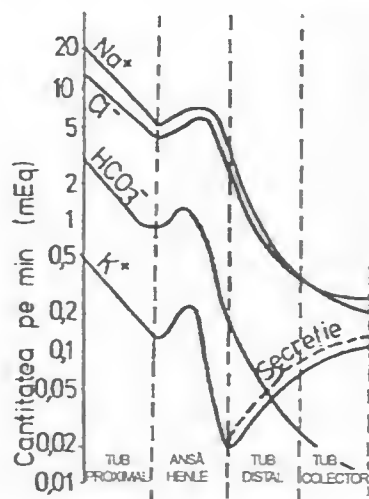


Fig. 11.19. Transportul principalilor electroliți de-a lungul tubului urinar.

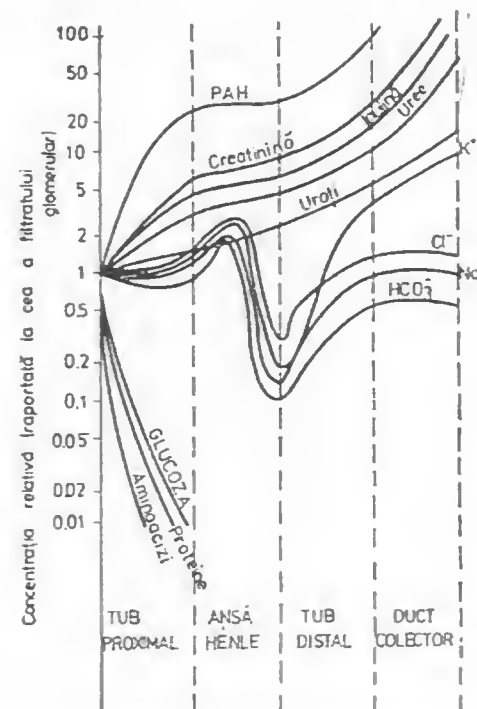
Transportul unor substanțe cu valoare nutritivă pentru organism. În ultrafiltratul glomerular trec din plasma sanguină numeroase substanțe cu importanță nutritivă pentru organism. Dintre acestea cităm în primul rând glucoza, mici cantități de proteine, acizi aminați, vitamine etc. În mod normal, așa cum s-a arătat mai înainte, acestea sunt în totalitate sau aproape complet reabsorbite la oivelul tubului contort proximal.

O particularitate deosebită o prezintă mecanismul de reabsorbție a proteinelor. Este cunoscut faptul că aproximativ 30 g de proteine trec prin membrana filtrantă în decurs de 24 de ore. Aceasta ar reprezenta o pierdere enormă pentru organism dacă ele nu ar fi readuse în torrentul circulator. Întrucât macromoleculele proteice au dimensiuni mult prea mari pentru a putea fi transportate prin mecanisme obișnuite, trecerea lor prin membrana celulei tubului proximal se realizează prin fenomene de pinocitoză. După ce proteina a fost introdusă în citoplasmă celulară prin intermediul veziculației membranare, ea este hidrolizată de către enzime specifice în aminoacizi constituenți. Acești acizi aminați sunt apoi trecuți într-un fenomen de transport activ, la nivelul membranei polului bazal al celulei proximale, în lichidul peritubular (fig. 11.20).

Transportul ureei de-a lungul tubului urinar. Datorită reabsorbției apei, prin gradient osmotic, la nivelul tubului urinar, concentrația ureei în lichidul tubular crește, astfel încât se realizează un gradient de concentrație pentru această substanță între compartimentul intranefronal și lichidul interstițial al rinichiului. Această diferență de concentrație obligă ureea să difuzeze din interiorul tubului către interstițiul renal.

Trecerea ureei, ca de altfel și a altor substanțe prin epiteliul tubular, este dictată, pe de o parte, de cantitatea de apă reabsorbită (realizarea gradientului), cât și de permeabilitatea membranei tubulare pentru substanța respectivă.

Fig. 11.20. Dinamica transportului unor substanțe organice și anorganice de-a lungul tubului urinar.



În general, permeabilitatea membranelor celulare pentru uree este suficient de ridicată. Datorită acestui fapt, în condițiile în care se produce concentrarea acestei substanțe în lichidul tubular, ea are tendința să retrodifuzeze spre spațiul interstițial. Totuși, este cunoscut faptul că, în urina finală, ureea este mult mai concentrată decât în plasmă. Acest fenomen este rezultatul variațiilor de permeabilitate a epitelului diferitelor segmente ale tubului urinifer (situație discutată și în cazul transportului apei) și al mecanismului de menținere a unei concentrații ridicate de uree în părțile profunde ale medulei rinichiului. Cantitatea de uree filtrată la nivelul glomerulilor renali este în funcție de fluxul de filtrare glomerulară. Din această fracție filtrată, un procent de aproximativ 30-40 este reabsorbit la nivelul tubului proximal. Procese de difuziune a ureei din urină în spațiul interstițial se petrec și la nivelul tubului distal.

Datorită dispoziției particulare a vaselor sanguine în zona medulară a rinichiului, care realizează un adevărat dispozitiv de schimburi contracurent, ureea difuzată în interstițiul zonelor profunde nu poate fi reluată în torrentul circulator, așa cum s-ar întâmpla în cortexul renal. Din această cauză, concentrația peritubulară a ureei în zonele medulare profunde este mult mai ridicată decât în urină. Fenomenul respectiv are consecințe funcționale deosebit de importante:

- cantitatea de uree pierdută de urină este redusă, deoarece gradientul de concentrație este redus;
- efectul osmotic al ureei din urina tubului colector este contrabalansat în cea mai mare parte de către ureea din spațiul interstițial;
- o parte din ureea intrată în ramul descendent al ansei Henle este recirculată prin sistemul tub distal-tub colector. Acest ultim proces a fost pus în evidență prin studii de micropuncție tubulară, care au arătat că urina primește de-a lungul ansei Henle o cantitate de uree echivalentă cu aproximativ jumătate din valoarea filtrată. În acest fel, o mare parte din ureea retrodifuzată din tubul colector este recirculată în tubul distal și doar o foarte mică parte este preluată de circulația sanguină a medulei.

Reciclajul medular. Procesul de reciclare medulară este reprezentat prin intrările în brațul descendent subțire al ansei Henle de uree, potasiu, amoniac și sodiu, care provin din porțiunea groasă a brațului ascendent în cazul Na^+ , Cl^- , NH_4^+ , ureei și din canalul colector medular în cazul K^+ și ureei (fig. 11.21). În acest mod are loc o creștere a concentrației substanțelor respective în interstițiul medulei interne.

Acest reciclaj limitează, astfel, reabsorbția de Na^+ , K^+ și uree și/sau favorizează secreția de NH_3 și K^+ , permițând menținerea excreției unei anumite substanțe în ciuda unui debit urinar foarte scăzut în caz de restricție hidrică. De fapt, pentru substanțele transportate în canalul colector la nivelul zonei medulare interne, cum ar fi Na^+ și ureea, care sunt reabsorbite, NH_3 secretat și K^+ fie reabsorbit, fie secretat, efectul variațiilor considerabile ale reabsorbției de apă (în cazul restricției hidrice sau încălcării apoase), responsabile de variațiile de concentrație în sens invers, ar putea să inducă variații importante ale transportului lor. În cazul restricției hidrice, concentrațiile luminaale foarte crescute de Na^+ , K^+ și uree ar putea să antreneze o reabsorbție importantă a acestor ioni, iar ionii NH_4^+ secretați ar trebui să fie în mare parte reabsorbiți.

Organismul evită aceste efecte prin posibilitatea de a realiza variații ale concentrației unei substanțe date în interstițiul medulei interne. În paralel cu concentrarea sa în lichidul tubular, în așa fel încât diferența de concentrare să rămână constantă. Deci, prin procesul de reciclare în medula rinichiului este posibilă această ajustare de concentrare.

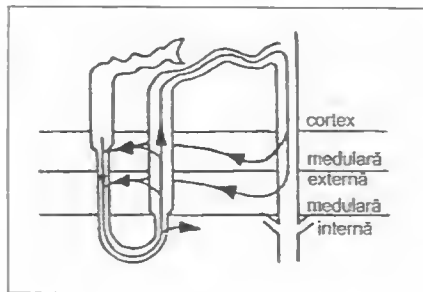


Fig. 11.21. Desfășurarea procesului de reciclaj medular al soluțiilor.

11.2.2.2. Mecanismele de diluție și concentrare a urinei

Faptul că rinichiul este capabil să elaboreze urină, a cărei densitate poate să varieze în limite foarte largi (1 000-1 050), a atras atenția specialiștilor în domeniul respectiv, întrucât nu există un mecanism activ (energetic) al transportului apei, iar, în același timp, orice mecanism osmotic trebuie să fie compatibil cu viața celulelor.

Dacă procesul de diluție a urinei poate fi ușor de imaginat printr-un fenomen de decuplare a reabsorbției substanțelor solvite de cea a apei, procesul de concentrare este departe de a fi ușor de explicat, întrucât sunt circumstanțe în care urina trebuie să fie atât de concentrată încât să se poată elimina maximum de produși nefolosiți organismului și, în același timp, să se rețină cât mai multă apă.

Enunțat sub forma unei ipoteze încă din 1942 (Kuhn), „mecanismul de concentrare a urinei prin contracurent” are la bază observații de fiziologie comparată și confirmări de natură experimentală; el conține încă unele semne de întrebare legate de explicarea proceselor atât de diferențiate ce se petrec de-a lungul tubului urinifer și al celorlalte formațiuni intrarenale.

S-a observat că doar animalele care au rinichi dotati cu ansă Henle sunt capabile să realizeze o urină concentrată, iar osmolaritatea acesteia poate să ajungă la valori cu atât mai mari, cu cât această formațiune este mai bine dezvoltată (șoarecele de deșert). Dispoziția paralelă a celor două ramuri ale ansei Henle și a canalelor colectoare apropie foarte mult morfo-fiziologia renală de sistemele fizice care funcționează prin schimburi în contracurent și de multiplicare în contracurent (fig. 11.22).

Mecanismul fizic de concentrare prin contracurent presupune existența unui flux lichidian constant prin două tuburi comunicante despărțite de un perete permeabil la apă și impermeabil pentru solviți (A). Menținerea fluxului constant reclamă realizarea unei diferențe de presiune hidrostatică între capătul de aducție și cel de evacuare. Această diferență trebuie să fie cu atât mai mare, cu cât orificiul de comunicare dintre cele două ramuri este mai îngust. Practic, se poate considera că, în aceste condiții, presiunea este aproximativ constantă de-a lungul întregii ramuri descendente (P) și ascendente (p), dar cu valori mai mici în ramul ascendent. Datorită gradientului presional transversal, prin cloazonul M trece numai apa din compartimentul cu presiune hidrostatică mai mare (P) în cel cu joasă presiune (p), realizându-se o concentrare progresivă către zonele cele mai profunde ale sistemului.

DEBIT DE INTRARE = DEBIT DE IEȘIRE

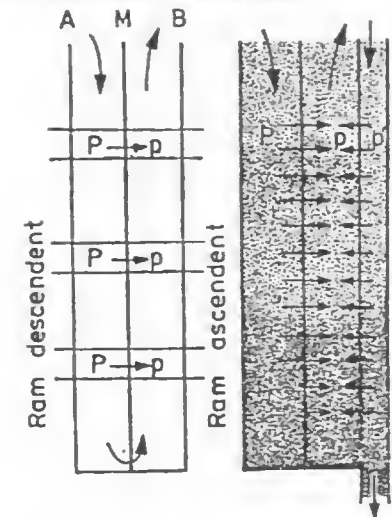


Fig. 11.22. Mecanismul fizic de concentrare prin contracurent. A, intrare. B, ieșire. M, difuziune membranară. P, permeabilizare.

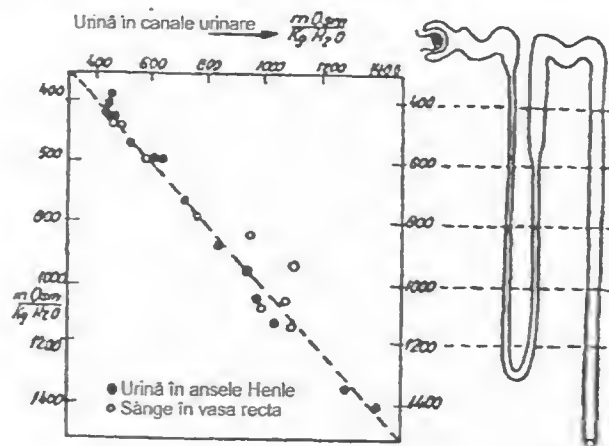


Fig. 11.23. Evoluția valorilor osmolarității în sens cortico-medular la nivelul parenchimului renal.

Acest sistem poate fi completat cu un al treilea tub (B), lipit ramurii ascendente a sistemului „în U”. Dacă și peretele lor despărțitor este permeabil numai la apă, are loc același fenomen de concentrare a soluției către zonele inferioare. Ultimul model poate fi comparat cu dispoziția ansei Henle și a tubului colector în parenchimul renal.

Ulterior, Wirz și colaboratorii au pus în evidență prin micropuncție nefronală și interstițială o creștere progresivă a osmolarității lichidiene dinspre zona corticală spre medulara profundă. S-a observat astfel că presiunea osmotică a urinei finale depinde de gradientul osmolar cortico-medular.

Osmolaritatea normală a ultrafiltratului glomerular este de 300 mOsm/l și ea se echilibrează cu presiunea osmotică a lichidului interstițial de la același nivel. Cu cât se avansează către părțile cele mai profunde ale medulei, presiunea osmotică crește, ajungând la nivelul papilei renale între 1 200–1 400 mOsm/l. Originea acestei importante creșteri a osmolarității în zonele profunde ale medulei este, în special, rezultatul transportului activ al Na^+ și Cl^- , dar și al transportului ureei și al altor ioni (fig. 11.23).

Menținerea gradientului de osmolaritate cortico-medular este nu numai rezultatul transportului activ de la nivelul ramurii ascendente și tubului colector, ci și al diferenței de flux sanguin între diversele zone ale rinichiului (1–2% din fluxul sanguin renal în medulara profundă, față de 80–90% în corticală), iar, pe de altă parte, și al dezvoltării unui mecanism de contracurent la nivelul ansei Henle și al vaselor drepte, tributare nefronilor juxtamedulari, care plonjează adânc în zona medulară (fig. 11.24).

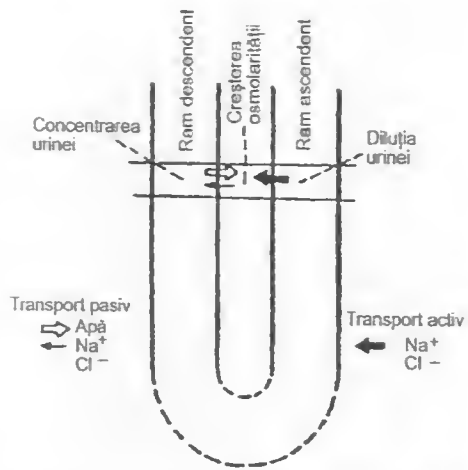


Fig. 11.24. Reprezentarea schematică a procesului de concentrare a urinei în ramul descendent al ansei Henle și în interstițiul renal.

Mecanismul contracurent se desfășoară într-un sistem în care lichidul se scurge într-un tub în formă de buclă alungită, în care cele două anse sunt foarte aproape una de cealaltă, în așa fel încât ele pot să-și schimbe diferiții constituenți. Dacă schimburile între cele două fluxuri se petrec în mod adecvat, acest sistem poate să ajungă să realizeze o concentrare importantă a substanțelor la nivelul vârfului buclei. Ramul descendent al ansei Henle se consideră a fi permeabil la apă, așa încât aceasta părăsește lumenul tubular datorită gradientului osmolar tub-interstițiu, realizându-se astfel concentrarea urinei către vârful ansei. Procesul de concentrare a urinei în ansă este amplificat de transportul activ al sodiului și clorului din ramul ascendent în interstițiu, iar, de aici, prin fenomenul de difuziune, în ramura descendentă, întrucât aceasta este permeabilă pentru ioni respectivi! Clorura de sodiu transportată în ramul descendent ajunge prin bucla ansei din nou în ramul ascendent, pentru a fi din nou transportată activ. Acești ioni se adaugă celor veniți odată cu filtratul glomerular și ajung în sistemul tubular, de unde, în aceeași măsură, sunt transportați în afara ramurii ascendente. Se observă, astfel, că nivelul clorurii de sodiu poate să crească considerabil în lichidul tubular, datorită, pe de o parte, fenomenului de retransport, iar, pe de altă parte, prin aportul constant al ionilor respectivi ca urmare a procesului de filtrare glomerulară. Acest mecanism realizat prin intermediul ansei Henle este numit „de contracurent multiplicator”, întrucât de fiecare dată când ClNa reface un tur al circuitului în ansă își „multiplică” concentrația în zona medulară.

Fluxul sanguin din vasele drepte realizează, de asemenea, un sistem care funcționează prin mecanism de concentrare prin contracurent, contribuind astfel la concentrarea clorurii de sodiu și a ureei la nivelul medulei (fig. 11.25). Particularitățile circulației sanguine în aceste vase determină scoaterea doar a unor cantități foarte mici de clorură de sodiu din interstițiul medular, menținându-se astfel puternicul gradient osmolar cortico-medular.

Datorită proceselor mai sus prezentate, osmolaritatea lichidului intratubular suferă modificări cantitativ-calitative la trecerea sa prin diferitele segmente ale tubului urinifer.

La nivelul tubului proximal, întrucât epiteliul tubular este permeabil în aceeași măsură atât pentru apă, cât și pentru soluiți, are loc o reabsorbție izoosmotică, așa încât în ansa Henle intră un lichid cu osmolaritate identică (300 mOsm/l) cu a filtratului glomerular, dar cantitativ mult redusă (20% din ultrafiltrat).

În segmentul descendent al ansei Henle, osmolaritatea urinei crește rapid datorită mai multor factori: a) difuziunea ionilor de sodiu și clor din interstițiu intraluminal; b) sinteza de uree și trecerea prin difuziune în lichidul tubular; c) trecerea osmotică a apei din tub în interstițiu datorită gradientului osmotic transversal. Datorită acestor fenomene la vârful ansei, volumul lichidului tubular reprezintă aproximativ 15% din cantitatea de urină primară, iar osmolaritatea este identică cu a interstițiului (1 200–1 400 mOsm/l).

La nivelul segmentului ascendent al ansei Henle (impermeabilă pentru apă) are loc transportul activ al unei mari cantități de sodiu și clor din lumen în interstițiu, având drept consecință o scădere brutală a osmolarității urinei, până la 100–200 mOsm/l. De la acest nivel, osmolaritatea urinei depinde de procesele de reabsorbție care au loc în segmentele distal și colector ale tubului urinifer (fig. 11.26).

În condițiile în care organismul are nevoie de apă pentru menținerea homeostaziei hidrice, de la nivelul complexului hipotalamo-hipofizar se elaborează hormon antidiuretic (ADH), care, ajungând la nivel tubular, permeabilizează porțiunea distală și tubul colector pentru apă. Lichidul care părăsește ramul ascendent al ansei Henle pierde rapid cantități mari de apă și se echilibrează osmotic cu interstițiul, așa încât în tubul colector urina ajunge cu o concentrație de 300 mOsm/l. Volumul de aproximativ 5% din ultrafiltratul glomerular, reprezentând urina care abordează tubul colector, traversează prin intermediul acestuia zone cu osmolaritate din ce în ce mai crescută ale medulei și se echilibrează aproape perfect prin

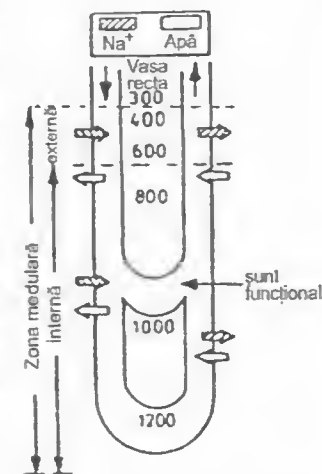


Fig. 11.25. Mecanismul de concentrare în vasele drepte.

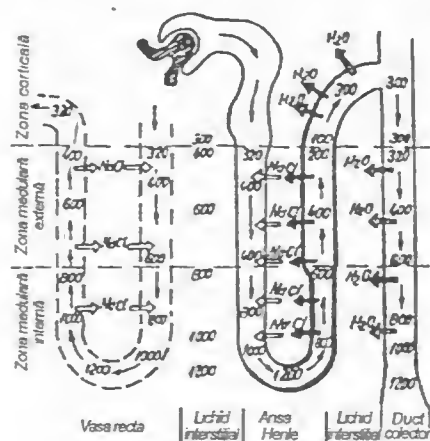


Fig. 11.26. Schemă privind mecanismul de concentrare a urinei prin contracurenți multiplicatori.

nivelul medularei, însă printr-un mecanism diferit de recirculare din tubul colector în interstițiu, și ramul ascendent al ansei Henle, producându-se astfel o concentrare până la 300 mOsm/l față de 4,5 mOsm cât există în ultrafiltratul glomerular.

Procesul de concentrare a urinei nu este numai factor de participare la producerea gradientului cortico-medular, ci reprezintă un mijloc de eliminare a unor cantități mari de uree, care s-ar putea concentra și prin alt mecanism încă necunoscut.

Capacitatea de concentrare și diluție a urinei poate să fie afectată în anumite circumstanțe:

- imposibilitatea echilibrării osmotice a lichidului tubular cu interstițiul medular;
- modificarea transportului de sodiu în ramul ascendent al ansei Henle;
- modificarea fluxului lichidian la nivelul tubilor contort distal și colector;
- schimbarea fluxului sanguin în zona medulară;
- modificarea cantității de uree acumulată în interstițiul medular.

11.3. PARTICIPAREA RINICHIULUI LA MENȚINEREA ECHILIBRULUI ACIDO-BAZIC

Întreținerea vieții și mai ales fenomenele legate de desfășurarea în bune condiții a activității celulare reclamă în mod indispensabil menținerea constantă a reacției mediului intern ($pH = 7,35-7,45$). De aceea, orice variație cât de mică către aciditate sau alcalinitate a pH -ului este contracarată imediat prin intermediul sistemelor tampon care acționează la nivelul lichidelor circulante ale organismului și, în mod particular, în plasma sanguină.

Sistemele tampon discutate la capitolul de sânge reprezintă însă mecanisme temporare și, adesea, de eficacitate incompletă în restaurarea pH -ului extracelular. Datorită intervenției acestor mecanisme, hidrogenul metabolic este redistribuit în organism sub forma tamponată, însă balanța sa, cât și conținutul ionului respectiv rămân neschimbate până la intervenția rinichiului. Întotdeauna trebuie să avem în vedere că, în mod normal, în organism există permanent o tendință spre acidoză. Această acidoză este rezultatul

trecerea apei din lumen în interstițiu, astfel că urina finală ajunsă la nivelul papilei renale este concentrată (1 200 mOsm/l) și reprezintă doar 0,5-1% din valoarea ultrafiltratului glomerular.

În cazul în care organismul are un exces de apă, hormonul antiuretic nu mai este eliberat de neurohipofiză în torrentul sanguin, așa încât urina care ajunge în tubul distal cu o osmolaritate de 100-200 mOsm/l nu va mai pierde apă. Concomitent se pot reabsorbi activ, în continuare, mici cantități de sodiu și alte substanțe, producând o scădere și mai accentuată a osmolarității urinei finale, care poate ajunge în unele cazuri la aproximativ 70 mOsm/l. Hiperhidratarea determină însă și o scădere a gradientului de osmolaritate cortico-medular, o creștere a volumului sanguin, a debitului de filtrare glomerulară, a fluxului lichidian tubular și a sângelui prin vase drepte, contribuind în ansamblu la eliminarea unei cantități mari de urină finală care are, astfel, și o concentrație scăzută.

Clorura de sodiu nu este singura substanță care participă la realizarea gradientului osmolar cortico-medular. Ureea atinge valori ridicate la

proceselor de catabolism celular, având drept urmare apariția acizilor fosforic, sulfuric, lactic, beta-oxibutiric etc. Acești produși reclamă pentru neutralizare aproximativ 150-200 mEq de baze pe zi, mai ales sub formă de bicarbonat. Rinichiul compensează excesul de acizi formați, excretându-i și, în același timp, recuperând bazele. Din această cauză, în marea majoritate a cazurilor, pH -ul urinei este acid ($pH = 6,2-6,5$).

Există mai multe mecanisme prin care rinichiul efectuează excreția de acizi și conservarea bazelor:

- secreția tubulară a ionului de hidrogen;
- reabsorbția aproape totală a bicarbonatului;
- acidifierea sărurilor fosfatice din sistemul tampon fosfat disodic-fosfat monosodic;
- excreția de amoniac.

11.3.1. SECREȚIA TUBULARĂ A IONULUI DE HIDROGEN

Secreția ionului de hidrogen în lichidul tubular se realizează continuu de-a lungul întregului tub unifer. Astfel de procese au fost puse în evidență atât la nivelul celulelor epiteliale din tubii contorți proximal și distal, cât și în celulele tubului colector.

Mecanismul intim prin care ionul de hidrogen este trecut din citoplasma celei epiteliale în lumenul tubular este încă necunoscut. Se semnalează însă un aspect particular al acestui fenomen, și anume capacitatea maximă a celei tubului colector de a expulza H^+ împotriva unui puternic gradient de concentrație. Astfel, secreția hidrogen-ionilor continuă în acest sector chiar atunci când în urină ionii respectivi se găsesc de o mie de ori mai concentrați decât în lichidul extracelular. Exprimat în valori de pH , procesul poate fi observat până când aciditatea urinei ajunge la $pH = 4,5$. De fapt, aceasta reprezintă și limita maximă a epitelului tubular de secreție a ionilor de hidrogen.

Din cantitatea de ioni de hidrogen secretați către rinichi, 80-85% se elimină la nivelul tubului contort proximal, deși maximum de concentrare a ionului respectiv în urina tubului proximal este de trei ori mai mare decât în lichidul interstițial, iar pH -ul poate să scadă doar cu 0,4-0,5 unități față de filtratul glomerular. Capacitatea tubului distal de a secreta ioni de hidrogen este intermediară între cea a tubului proximal și a celui colector. Ionul de hidrogen este trecut în lumenul tubular în schimbul ionului de sodiu, existând o competiție cu ionul de potasiu. Secreția ionului de hidrogen este reglată și de concentrația bioxidului de carbon din lichidul extracelular. Între aceste fenomene există o relație de directă proporționalitate.

Pitts (1958) a arătat că transferul de H^+ spre lumenul tubular se efectuează secundar reabsorbției active de Na^+ . Transferul activ al Na^+ creează un exces de sarcini negative în tub și un exces de sarcini pozitive în celula tubulară. Acest dezechilibru electro-chimic este contracarat fie prin eliminarea de H^+ în tub, fie prin reabsorbția de Cl^- din lumen în celulă. În aceste condiții, prezența clorului în cantitate scăzută la nivelul filtratului glomerular va stimula eliminarea de H^+ , constituind, în această situație, singurul mecanism de reechilibrare a electroneutralității.

În acest proces se pare că mecanismul fundamental îl constituie capacitatea tubului renal de a elimina direct ionul de hidrogen, fie ca atare, fie, mai ales, sub forme combinate de clorură de amoniu.

11.3.2. REABSORBȚIA DE BICARBONAT LA NIVELUL RINICHIULUI

În mod normal, toată cantitatea de ion bicarbonic filtrat este reabsorbită (aproximativ 5 000 mEq/24 h). Această reabsorbție implică un schimb între ionii de hidrogen secretați de celulele tubulare și ionii de sodiu din urină.

Ionii de H^+ sunt disponibili în celula tubulară, întrucât anhidraza carbonică de la acest nivel convertește CO_2 (produs de catabolism prezent în toate celulele) și apa în acid carbonic. Acidul carbonic disociază în H^+ și HCO_3^- . Ionul de hidrogen trece din celula tubulară în lumen, se combină cu ionul bicarbonat din urina tubulară și formează acidul carbonic. Reacția de formare a acidului carbonic în lumenul tubular este catalizată tot de anhidraza carbonică, prezentă la nivelul membranei polului apical al celulelor tubului contort proximal. Acidul carbonic se descompune în apă și CO_2 . Apa se pierde cu urina, iar CO_2

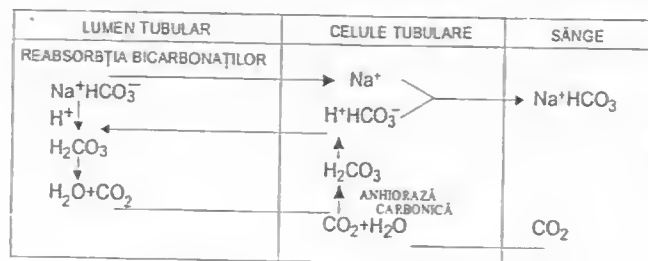


Fig. 11.27. Participarea rinichinului la menținerea echilibrului acido-bazic prin mecanismul de reabsorbție a bicarbonatului.

reintră în celula tubulară printr-un proces pasiv de difuziune de-a lungul unui gradient de concentrație. Concomitent, Na^+ trece din fluidul tubular în celulele tubulare, unde se combină cu anionii bicarbonat prezenți aici spre a forma bicarbonatul de sodiu, care trece spre lichidul periubular și, de aici, în plasmă. Această recuperare de bicarbonat are rol de conservare a concentrației sale plasmatice. Ionul bicarbonic prezent în sângele venos renal nu este însă identic cu cel filtrat la nivelul glomerulilor, ci doar rezultanta cantitativă este egală, ca și cum s-ar fi efectuat resorbția bicarbonatului filtrat (fig. 11.27).

11.3.3. SISTEMUL TAMPON FOSFAT DISODIC—FOSFAT MONOSODIC

La nivelul tubului distal și al tubilor colectori, fosfatul disodic și alte substanțe tampoo filtrate glomerular acceptă ionii de H^+ , care sunt secretați în mod activ în competiție cu K^+ , și oferă în schimb ioni de sodiu, care sunt reabsorbiți.

În urina tubulară, fosfatul disodic se disociază ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \rightleftharpoons \text{Na}^+ + \text{NaH}_2\text{PO}_4$), Na^+ se deplasează spre lichidul tubular unde, unindu-se cu fosfatul monosodic, formează o sare fosforică dihidrogenată (NaH_2PO_4), care este excretată (fig. 11.28).

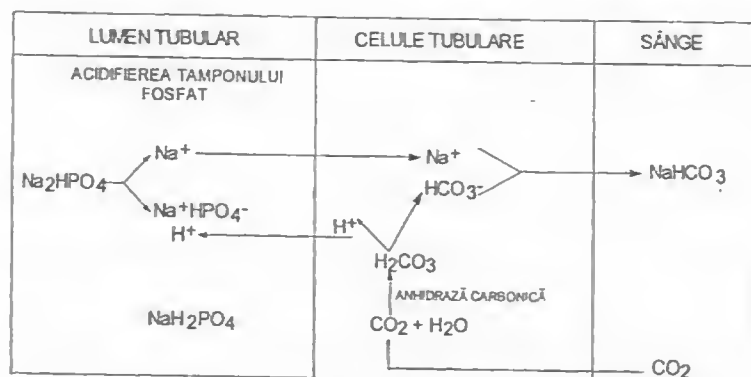


Fig. 11.28. Reprezentarea schematică a intervenției sistemului fosfat disodic-fosfat monosodic la acidifierea urinei.

Fosfatul disodic este cel mai important sistem tampon urinar datorită cantității sale crescute în lichidul tubular, cât și constantei sale de disociere ($\text{pK} = \text{logaritmul cu semn schimbat al coconstantei de disociere} = 6,8$), ceea ce situează zona optimă de acțiune la nivelul pH-ului urinar. Întrucât numai unul din cei doi ioni de Na^+ ai fosfatului disodic este reabsorbit și înlocuit cu H^+ , se poate deduce că pH-ul fosfatului monosodic se situează sub limita fiziologică a pH-ului urinar la om. Așa se explică de ce atunci când toată cantitatea de fosfat disodic a fost utilizată, iar secreția de H^+ se produce în continuare, are loc scăderea mai departe a pH-ului urinar, titrându-se substanțe tampon urinare secundare cu pK coborât, cum ar fi creatinina ($\text{pK} = 4,97$), beta-hidroxiubutiratul ($\text{pK} = 4,5$) etc.

11.3.4. SECREȚIA DE AMONIAC

Unul din mecanismele principale prin care rinichiul asigură menținerea echilibrului acido-bazic al organismului este constituit de posibilitatea tubilor renali de a sintetiza amoniacul și de a excreta acizii ca săruri de amoniu, economisind astfel bazele fixe.

Amoniacul este format în celula tubulară, având drept sursă principală glutamina, care, prin azotul său aminic, este capabilă să pună în libertate NH_3 . De altfel și azotul său aminic, după cum și cel al alaninei, glicocolului, acidului glutamic sunt surse importante de amoniac.

Calea formării de amoniac în celula tubulară constă în conversiunea glutaminei în glutamat și amoniac. Reacția este catalizată de glutaminaza 1. Se pare însă că intervin și alte aminoxidaze ce eliberează amoniac; din glicocol, alanină, leucină, histidină (fig. 11.29).

S-a sugerat prezența unui mecanism de *feed-back* în celula tubulară, pe baza observației că producția de amoniac renal scade dacă în celula tubulară crește concentrația de amoniac și glutamat.

Amoniacul eliberat difuzează pasiv din celulă prin membrana acesteia în ambele seosuri, în funcție de gradientul de concentrație.

S-a stabilit că amoniacul trece în fluidul tubular de-a lungul întregii lungimi a tubului urinar și că la nivelul ansei Henle există un grad de retrodifuziune a acestuia. Deci, din cauza difuzibilității particulare a amoniacului, este dificil să se precizeze exact care celule îl produc.

În lichidul tubular acid, amoniacul se unește cu un ion de hidrogen și se formează ion de amoniu (NH_4^+), care este excretat sub formă de clorură de amoniu (ClNH_4). Convertirea amoniacului în ion de amoniu la nivelul tubului urinar se realizează conform echilibrului Henderson-Hasselbach. Ionii de amoniu, fiind nedifuzibili, sunt blocați în lichidul tubular și eliminați în mod obligatoriu cu urina.

Secreția de amoniac este cu atât mai mare, cu cât lichidul tubular conține mai puțini fosfați sau bicarbonați și cu cât reabsorbția de Na^+ este mai intensă, iar puterea de secreție a K^+ mai limitată.

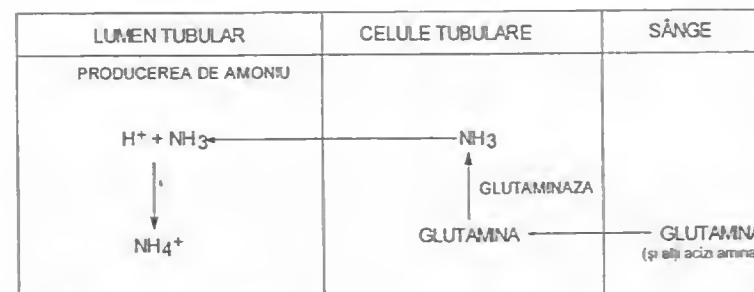


Fig. 11.29. Sinteza de amoniac la nivelul celulei tubulare și eliminarea sa urinară sub forma sărurilor de amoniu.

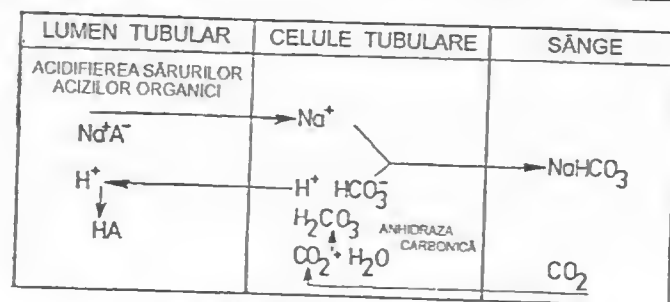


Fig. 11.30. Mecanismul de acidifiere a urinei prin intermediul sărurilor acizilor organici.

Din cele discutate până acum se remarcă intervenția directă sau indirectă a bicarbonaților în cadrul tuturor mecanismelor renale de reglare a pH-ului.

În acidoză, toate cele trei mecanisme reglatoare sunt exacerbate. Se admite că gradientul de concentrație al H^+ , pe care-l poate realiza tubul renal între sângele capilarelor peritubulare și urină, este de maximum 100/1, astfel încât pH-ul urinar minim devine 4,4–4,5 față de 7,35–7,45 al plasmăi (fig. 11.30).

În acidoză, excreția de bicarbonat scade sau dispare, aciditatea titrabilă a urinei și excreția de Cl^- cresc, iar excreția de cationi scade.

În caz de alcaloză, urina poate atinge valori de pH până la 7,8 cu excepția alcalozei prin depleție potasică, când pH-ul urinar poate rămâne scăzut. Excreția de bicarbonat și cationi (Na^+ și K^+) crește, iar cea de săruri de amoniu scade. Aciditatea titrabilă și excreția de Cl^- scad, de asemenea.

11.3.5. LIMITELE INTERVENȚIEI RINICHIULUI ÎN MENȚINEREA ECHILIBRULUI ACIDO-BAZIC

Cantitatea totală de substanțe tampon existentă în întregul organism se cifrează la aproximativ 1 000 milimoli. Dacă toată această rezervă ar fi epuizată instantaneu prin injectarea de substanțe acide sau alcaline, rinichii ar putea să readucă pH-ul mediului intern la valorile inițiale în 10–20 de ore. Viteza de desfășurare a mecanismului prin care rinichiul intervine în reglarea concentrației ionilor de hidrogen nu este prea mare, în schimb mecanismele renale au capacitatea de a funcționa până când reacția mediului intern revine la valorile de fond. În mod obișnuit, rinichii sunt capabili să îndepărteze zilnic din organism 500 milimoli de sarcini acide sau bazice.

11.4. FUNCȚIA ENDOCRINĂ A RINICHIULUI

În ultimele decenii, au fost semnalate tot mai multe date care au pus în evidență faptul că la nivelul rinichiului sunt diferențiate anumite structuri care au rol de a secreta unele substanțe cu proprietăți hormonale. Sunt aceste principii substanțe cu rol de hormoni locali sau generali? În rândurile ce urmează vom încerca să prezentăm succint anumite aspecte ale acestor observații, lăsând cititorului și, mai ales, timpului să tranșeze exact asupra rolului lor în organism. Până în prezent, sunt unanim acceptați ca produși secretați la nivelul rinichiului: renina, factorul vasodilatator – medulina, eritropoietina și kininogeninele. În deceniul trecut au apărut și unele cercetări care consideră că transportul ionului de sodiu la nivelul tubului proximal ar fi controlat de un anumit hormon, numit natriferina. Datorită capacității de sinteză și eliberare a acestor substanțe se atribuie rinichiului rol de glandă endocrină.

11.4.1. RENINA

Observații sistematice în legătură cu eliberarea reninei de către rinichi au apărut după descoperirea de către Tigersted și Bergman (1898) a unei substanțe presoare în extractul renal de iepure. Acești cercetători au denumit principiul respectiv *renină*.

Renina este o enzimă proteolitică, cu structură glicoproteică (g.m. 37 326), elaborată la nivelul aparatului juxtaglomerular, descrisă de Goormaghtigh (1939).

Este stabilit în prezent că renina se elaborează la nivelul celulelor granulare juxtaglomerulare, dar că eliberarea sa în torrentul circulator poate să fie rezultatul stimulilor veniți de la nivelul diverselor formațiuni ale aparatului juxtaglomerular.

Renina, eliberată în sângele circulant, inițiază o cascadă de reacții metabolice (transformarea angiotensinogenului în angiotensină I inactivă și a acestuia în angiotensină II de către enzima de conversie), întrucât ea nu este activă ca atare, ci prin intermediul angiotensinei II (fig. 11.31).

Complexitatea sistemului renină-angiotensină a crescut mult din momentul în care s-au evidențiat adevărate sisteme *renin-like* și în alte organe. Astfel de substanțe *enin-like*, denumite izorenine, au fost semnalate în glanda submaxilară, uter și placentă, lichidul amniotic, limfă, peretele arterelor și miocardului, țesutul nervos și mai ales în glandele hipofiză și epifiză.

Există o secreție de fond a reninei în scopul întreținerii procesului de autogreglare a funcțiilor glomerulo-tubulare. De altfel, există numeroase date care atestă o reninemie a cărei valoare este însă foarte variabilă, de 3–9±7 ng Ang II/min. Această valoare de bază suferă anumite ajustări în funcție de modificările ce apar la nivelul nefronului.

Reglarea secreției de renină la nivelul aparatului juxtaglomerular se realizează prin intermediul mai multor factori:

- fluxul sanguin renal;
- variațiile sodiului plasmatic și urinar;
- volumul sanguin total;
- modulații ale activității nervoase vegetative.

Rolul sistemului renină-angiotensină. Studiile privind implicațiile sistemului renină-angiotensină au fost urmărite mai ales prin injectarea principiului activ – angiotensina II, și aceasta în doze farmacologice. În urma acestor cercetări s-a ajuns la concluzia că angiotensina are două acțiuni principale, efect vasoconstrictor și aldosterono-eliberator. Impedimentele ivite atunci când s-a încercat să se urmărească efectele angiotensinei injectate în circulația generală asupra funcției renale au făcut ca acest rol să fie dificil de precizat. Acest fapt se datorește mai ales polarizării atenției asupra implicațiilor

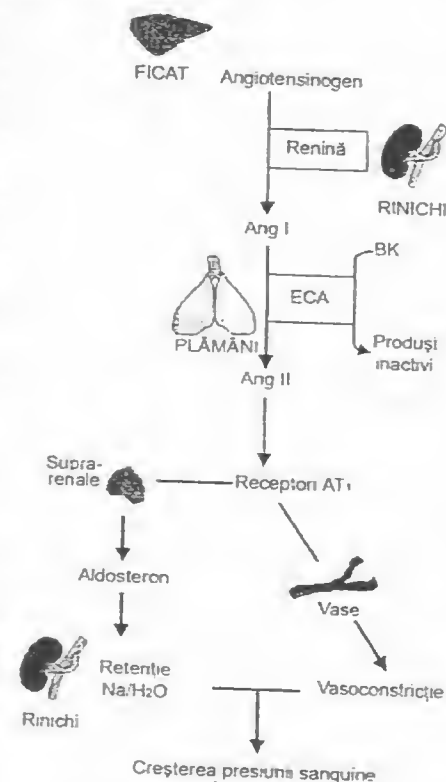


Fig. 11.31 Schema clasică a sistemului renină-angiotensină.

eventuale ale sistemului respectiv în hipertensiunea arterială și în tulburările hidroelectrolitice prin veriga corticosuprarenală-aldosteron. Alături de aceste date, prezența elementelor sistemului renină-angiotensină și în alte structuri decât rinichiul au determinat pe diverși autori să descrie o serie de alte efecte, cum ar fi cele asupra miocardului, în evoluția sarcinii, a senzației de sete, a echilibrului hidroelectrolitic neuronal și general etc.

Angiotensina este cea mai puternică substanță vasoconstrictoare cunoscută. Efectul său constrictor întrece până la 40-100 de ori acțiunea noradrenalinei. Efectul cardio-vascular al angiotensinei se realizează atât prin mecanism direct de acțiune asupra acestor structuri, cât și prin efect indirect, mediat pe cale reflexă de sistemul nervos vegetativ. Polipeptidul acționează predominant la nivelul arteriolelor, în teritoriul precapilar, determinând creșterea rezistenței periferice și scăderea fluxului sanguin în teritoriul respectiv. Acțiunea vasoconstrictoare este mai puternică în teritoriul splanhnic, piele și rinichi decât la nivelul vaselor din mușchi, creier și inimă. În funcție de capacitatea de răspuns diferită la angiotensină a arterelor s-a preconizat testul Kaplan-Silab, în diagnosticul diferențial al hipertensiunii arteriale.

Sistemul simpatico-adrenergic eliberator de catecolamine este stimulat de angiotensină atât la nivel periferic, cât și prin mecanism central, prin intermediul arii postrema. Efecte stimulatorie similare sunt descrise și în cazul ganglionilor vegetativi și al medulosuprarenalei.

Numeroase date au demonstrat că angiotensina II prezintă efecte aldosteron-eliberatoare directe. Între secreția de renină și aldosteron există relații de directă proporționalitate. Efectul respectiv apare la doze inferioare celor presoare, așa încât unii autori atribuie angiotensinei rol de hormon aldosteronotrop.

Alături de intervenția sistemului renină-angiotensină la menținerea homeostaziei hidroelectrolitice a organismului prin modificări ale funcției renale, există date în literatură care atestă și rolul diptogen al angiotensinei II. După injectarea acestui polipeptid activ în circulația generală, ventriculii cerebrali laterali sau diverse alte structuri nervoase (în mod particular hipotalamusul), s-a observat apariția senzației de sete și ingerarea unei mari cantități de apă.

Musculatura netedă extravasculară este stimulată, mai ales *in vitro*, pe cale indirectă ganglionară. Asupra mușchiului uterin, angiotensina acționează însă prin mecanism direct, predominant muscular.

Mecanismul intim de acțiune al angiotensinei este însă insuficient cunoscut. Acțiunea proprie asupra musculaturii netede vasculare, uterine și intestinale se datorește afinității pentru o categorie de receptori specifici (A_1 și A_2).

La nivel celular, angiotensina acționează atât prin formarea de cAMP, cât și prin stimularea transportului activ de ioni de-a lungul membranelor celulare. O acțiune stimulatorie a creșterii celulelor musculare cardiace și vasculare a fost recent demonstrată pe culturi de țesuturi.

În afara acțiunilor proprii, angiotensina exercită o serie de efecte mediate de către catecolamine și aldosteron.

Din datele noastre experimentale rezultă că sistemul renină-izorenină-angiotensină se comportă ca un sistem hormonal unitar. Diverșii excitanți fiziologici (ischemie, hiponătreemie, hipovolemie, hipotensiune etc.) determină eliberarea de renină și izoenzime tisulare, urmată de creșterea conținutului în angiotensina producătoare de efecte vasculare, metabolice și comportamentale generale, ce se întregesc și se completează reciproc. Proprietățile vasoconstrictoare, anidiuretice, catecolamino- și aldosteronoeliberatoare periferice ale angiotensinei sunt întregite de reacțiile presoare, diptogene și ADH-eliberatoare centrale. Prin modificările vasculare, volumice și hidroelectrolitice astfel realizate, sistemul renină-izorenină-angiotensină adaptează nu numai conținătorul la conținut, ci și conținutul la conținător.

Așadar, în afara participării sale la autoreglarea circulației locale (renale), sistemul renină-izorenină-angiotensină îndeplinește rolul unui sistem hormonal general care contribuie pe căi multiple centrale și periferice la menținerea balanței hidrosaline și asigurarea homeostaziei circulatorii.

Dacă rolul fiziologic al sistemului renină-angiotensină este insuficient precizat, literatura de specialitate abundă în date privind implicațiile sale fiziopatologice.

Prin acțiunea vasoconstrictoare, aldosteronoeliberatoare și stimulatorie a sistemului adreno-simpatic, sistemul renină-angiotensină determină creșterea rezistenței periferice și a volemiei, generând astfel

hipertensiunea arterială. Creșterea presiunii arteriale poate să apară fie ca reacție compensatoare tranzitorie în caz de hipotensiune, hipovolemie sau ischemie renală, fie ca fenomen permanent întreținut de alterarea morfo-funcțională a parenchimului renal și a arborelui vascular.

În afară de implicațiile prin efecte vasoconstrictoare în diferitele sindroame hipertensive, sistemul renină-angiotensină participă și prin perturbarea secreției normale de aldosteron. Activitatea reninei plasmatică prezintă valori crescute în diversele forme de hiperaldosteronism secundar însoțite de hipertensiune și edeme.

Sistemul renină-angiotensină este implicat și în apariția diverselor tulburări generatoare de disgravidii.

Descoperirea sistemului renină-angiotensină, deși a contribuit la clarificarea asocierii bolilor renale cu cele cardio-vasculare, conține încă suficiente necunoscute. Noi aspecte fizio-farmacologice indică utilizarea inhibitorilor enzimei de conversie în tratamentul bolilor cardio-vasculare.

11.4.2. ERITROPOIETINA

Cercetări întreprinse la începutul secolului nostru, reluate în ultimii ani, au precizat că în urma hipoxiei apare în circulația generală un factor care are rolul de a stimula eritropoeza. Acest factor a fost numit factor stimulator al eritropoezei (ESE) sau *eritropoietina*. Ulterior, au apărut numeroase constatări în care s-a precizat că eritropoietina este capabilă să stimuleze formarea de globule roșii atât la animalele normale, cât și la acelea cu hematopoeză deficitară.

S-a precizat apoi că eritropoietina este produsă în cea mai mare parte la nivelul rinichiului. Această constatare a fost făcută ca urmare a unor observații realizate pe bolnavi cu diferite afecțiuni renale însoțite de anemie ca, de altfel, și la animale cu binefrectomie. De asemenea, s-a observat că extractul renal obținut de la animale în hipoxie prezintă o activitate de stimulare a eritropoezei.

Cercetările făcute în urmă cu zece ani au adus noi date privind elucidarea naturii și rolul acestui factor renal. Substanța respectivă este prezentă în fracția microzomală renală. Ea are proprietăți enzimatică, întrucât din interacțiunea sa cu un substrat proteic plasmatic (globulină plasmatică sau serică) rezultă eritropoietina (F.S.E.) (fig. 11.32), având ca precursor eritrogenina.

Se pare că eritropoietina este formată de întregul parenchim renal, deoarece studiile de urmărire a distribuției acestei substanțe în cortexul renal sau în zona medulară nu au pus în evidență deosebiri semnificative. Eritropoietina se sintetizează continuu la nivelul rinichiului și aceasta datorită faptului că în mod normal există o stare de hipoxie relativă a tubilor renali. Dacă la unele specii de mamifere, rinichiul reprezintă singura sursă de eritropoietină (câine), pentru alte specii (om, șobolan, iepure) s-au descris și alte țesuturi responsabile de secreția acestui factor.

Din datele prezentate rezultă că eritropoietina reprezintă o verigă a unui sistem tisular activat de hipoxie. Mai mult, s-a descris ulterior și un factor inhibitor care ar avea efect de blocare a eritropoietinei.

Referitor la mecanismul de formare, cât și la efectele eritropoietinei s-a încercat o analogie cu sistemul renină-angiotensină și plasmakinine. Eritropoietina s-ar produce, ca și angiotensina și plasmakininele biologic active, în urma reacției enzimatică asupra unei globuline plasmatică. De asemenea, se poate afirma că eritropoietina face parte din grupul polipeptidelor plasmatică biologic active. Stimularea eritropoezei prin eritropoietină determină creșterea volumului globular sanguin, în timp ce angiotensina și plasmakininele intervin în reglarea volumului plasmatic.

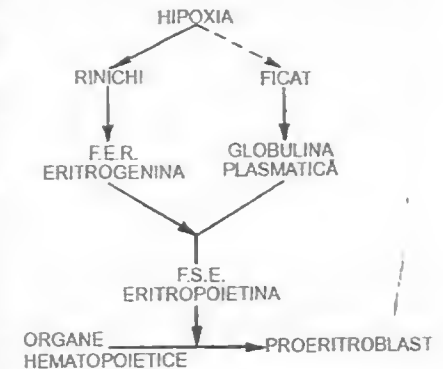


Fig. 11.32. Reprezentare schematică privind formarea și efectele eritropoietinei. F.S.E., factorul de stimulare a eritropoezei. F.E.R., factorul eritropoietic renal.

11.4.3. FACTORUL VASODILATOR RENAL (MEDULINA)

Concurent cu datele experimentale privind implicațiile rinichiului în apariția unor sindroame de hipertensiune arterială s-a ivit și supoziția opusă, adică a intervenției acestui organ ca protector al creșterii presiunii arteriale. Studii ulterioare au pus în evidență, în extractele de zonă medulară renală, unele fracțiuni de natură lipidică care erau dotate cu aceste proprietăți. Principiul activ a fost numit „lipid reno-medular antihipertensiv” (LRAN), pentru ca Lee (1967) să îl denumească „medulina”, întrucât factorul antihipertensiv reno-medular lipidic este format în medula rinichiului.

Întrebarea care s-a ridicat a fost dacă acest principiu format la nivelul rinichiului are rol asupra organului formator sau acționează ca un agent umoral. Cei mai mulți cercetători au ajuns la concluzia că medula rinichiului este structura care conferă acestui organ funcția antihipertensivă.

În zona medulară renală s-au pus în evidență celule interstițiale încărcate cu lipide. Acestea au caracterele unor celule secretoare și sunt în strânsă legătură cu vasa rectae și tubii uriniferi. Faptul că celulele respective au proprietăți secretoare și că încărcarea lor cu lipide variază a atras atenția asupra posibilităților ca acestea să aibă rol în producerea și eliberarea de LRAN.

La nivelul rinichiului s-au pus în evidență mai multe tipuri de prostaglandine. Scheletul tuturor acestor substanțe are la bază structura chimică a unui acid gras polinesaturat cu 20 de atomi de carbon, acidul prostanoic (fig. 11.33).



Fig. 11.33. Structura acidului prostanoic.

În cercetările sale privind natura chimică a medulinei, Lee a constatat că aceasta este alcătuită din mai mulți componenți de natură lipidică, printre care PGE_2 și $\text{PGF}_{1\alpha}$ și PGA_2 . Dintre acestea, acțiunea vasomotorie cea mai marcată o prezintă PGE_2 . Studii ulterioare au precizat că în zona medulară a rinichiului se găsesc și alte prostaglandine, cum ar fi $\text{PGF}_{2\alpha}$. În același timp, s-a constatat că și în zona corticală se găsesc cantități foarte mici de prostaglandine.

Odată sintetizate la nivelul rinichiului, prostaglandinele sunt imediat catabolizate enzimatic. S-au descris două sisteme enzimatic de inactivare a prostaglandinelor atât în plămân, cât și la nivelul rinichiului. Unul dintre acestea este 15-hidroxi-prostaglandin dehidrogenaza, fiind cea mai activă, iar al doilea determină reducerea dublei legături între C_{13} și C_{14} . Prostaglandinele sintetizate la nivelul regiunii medulare renale pot să apară și în circulația generală.

Efectele biologice ale prostaglandinelor reno-medulare. Fiind incluse în grupul biocatalizatorilor, prostaglandinele acționează în doze foarte mici, de ordinul nanogramelor (1×10^{-9} g). Acțiunea lor diferă ca sens și intensitate de la un organ la altul.

S-au descris numeroase acțiuni ale prostaglandinelor la nivelul aparatului circulator, tractului gastro-intestinal, plămânilor, sferei genitale, sistemului nervos, glandelor endocrine etc.

Activitatea rinichiului este intens influențată atât la nivelul polului vascular, cât și al celui tubular de către prostaglandine. Injectarea de PGE_2 în artera renală produce o puternică vasodilatație, reducând rezistența patului vascular renal la jumătate. Modificările hemodinamice renale determină astfel o creștere a fluxului plasmatic renal, a debitului urinar și excreției sodiului. Efecte asemănătoare produc PGA_2 și PGA_2 . Mai mult, efectele hemodinamice ale prostaglandinelor la nivel renal sunt selective, producând o redistribuire a fluxului sanguin renal. În timp ce la nivelul zonei corticale determină creșterea fluxului sanguin, la nivelul medulei același preparat scade debitul de sânge.

Nenumărate lucrări au pus în evidență că vasodilatația produsă de prostaglandinele renale (PGA_2 și PGE_2) reprezintă acțiunea antihipertensivă a acestora în diferite forme de hipertensiune experimentală. În sprijinul acestui punct de vedere vin următoarele fapte:

- nefrectomia bilaterală provoacă hipertensiune;
- hipertensiunea rezultată în circumstanțele anterioare dispare după administrarea de extracte de medulară renală;

- grefarea unui rinichi normal atenuează hipertensiunea produsă de binefrectomie.

Injectarea de PGA_2 la un bolnav cu hipertensiune esențială aduce tensiunea la normal, ca urmare a efectului dilator arteriolar direct, urmată de scăderea rezistenței periferice.

Plecând de la aceste constatări experimentale, s-a emis părerea că una din cauzele hipertensiunii esențiale ar putea fi carența congenitală sau câștigată în prostaglandine de origine renală. În acest fel, se confirmă ideea emisă în urmă cu peste 60 de ani de Goldblatt (1934), conform căreia rinichiul normal ar avea și un rol antihipertensiv.

La nivelul tubului urinifer, prostaglandinele determină o scădere a reabsorbției Na^+ și eliminarea lui crescută prin urină.

Asupra realizării efectului natriuretic al acestor substanțe s-au emis mai multe ipoteze. Unii cercetători sunt de părere că natriureza reprezintă doar efectul vasodilatației produse de prostaglandine. O a doua ipoteză consideră efectul natriuretic ca rezultat al inhibiției directe a proceselor energetice de activare a pompei de Na^+ de către prostaglandine. Studii efectuate prin intermediul micropunțiilor au precizat că prostaglandinele își exercită acest efect la nivelul tubului distal. Întrucât prostaglandinele produc și o creștere a excreției de potasiu prin urină, s-a tras concluzia că ele nu ar interfera cu acțiunea aldosteronului asupra reabsorbției Na^+/K^+ la nivelul tubului distal. O altă părere ar consta în aceea că, prin efectul lor vasodilator, prostaglandinele produc șuntarea unui număr de capilare peritubulare.

Prostaglandinele cresc clearance-ul apei libere. În acest context s-a emis ipoteza că prostaglandinele ar avea o acțiune anti-ADH.

Se pare că prostaglandinele interferează competitiv la nivelul tubului distal cu sistemul renin-angiotensină. De asemenea, prostaglandinele au efect de moderare sau chiar de inhibiție a peristaltismului ureteral.

În cursul studiilor privind prostaglandinele renale s-au pus în evidență și alți factori biologici activi de natură lipidică. Astfel, s-a izolat un fosfolipid renin-inhibitor în rinichiul de câine. Acest fosfolipid renin-inhibitor are efect de scădere a presiunii sanguine la animale de experiență cu hipertensiune renală cronică. Alături de această substanță au fost evidențiate și alte fosfolipide în rinichi, cum ar fi: fosfatidiletanolamina, sfingomielina și fosfatidilserina, a căror acțiune este insuficient cunoscută.

11.4.4. ELIBERAREA DE ENZIME KININOFORMATOARE

Kininogeninele (sistemul kaliceinogen-kaliceină) eliberate în plasma sanguină acționează asupra unei globuline plasmatice (kininogen), determinând formarea unor substanțe biologice active de tipul bradikininei, denumite plasmakinine. Imediat după formare, plasmakininele sunt rapid inactivate de către carboxipeptidaze (kininaze) prin ruperea și îndepărtarea argininei din lanțul polipeptidic (fig. 11.34).

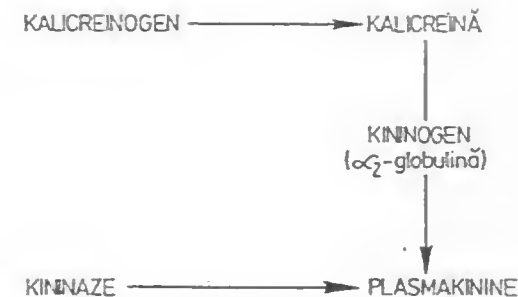


Fig. 11.34. Reacții de formare și inactivare a plasmakininelor.

Formate în torontul circulator, plasmakininele își manifestă efectele lor multiple, între care pe prim plan se situează vasodilatația locală și creșterea permeabilității capilare. La nivel renal, aceste efecte sunt prezente în plenitudinea lor, explicând apariția proteinuriei tranzitorii din cursul efortului fizic.

S-au descris fenomene de adevărată competiție între polipeptidele vasoactive la nivelul capilarelor renale și din circulația generală. Un exemplu elocvent este dat de echilibrul dinamic ce se realizează între sistemele renină-angiotensină și plasmakinine.

După cum predomină activitatea proteolitică a kaliceinei sau a reninei asupra alfa₂-globulinei plasmatice vor rezulta cantități mai mari sau mai mici de plasmakinine, respectiv angiotensină, cu acțiuni vasculare antagoniste. Așa se întâmplă în diferite circumstanțe la nivelul rinichiului în vederea menținerii în limite constante a irigației glomerulare.

11.5. ASPECTE PRIVIND MENȚINEREA ECHILIBRULUI GLOMERULO-TUBULAR

După introducerea metodei *clearance*-ului renal în studiul fiziologiei rinichiului, au apărut observații care indicau existența unei relații de directă proporționalitate între procesele de reabsorbție a sodiului, glucozei, apei etc. și fluxul filtrării glomerulare (Smith, 1937). Tehnica micropuncțiilor (fig. 11.35) a confirmat acest punct de vedere, aducând unele precizări de valoare deosebită. Astfel, prin micropuncția tubilor uriniferi la mamifere s-a observat că la nivel proximal se reabsoarbe o fracțiune cu valoare constantă din cantitatea de filtrat glomerular. În acest fel apare noțiunea de „echilibru glomerulo-tubular”, care se referă însă numai la relațiile dintre fluxul filtrării glomerulare (FFG) și reabsorbția proximală a sodiului.

Ulterior, s-au găsit explicații morfologice ale acestui proces. Prin microdisecție și micromăsurători directe s-a stabilit o interrelație liniară între dimensiunile (lungime, suprafață, volum etc.) glomerulului și tubul contort proximal.

În acest context, în ultimul timp au apărut o serie de teorii care tind să explice fenomenul respectiv pe baze pur matematice, luând în discuție procesele biologice în complexitatea lor, așa cum se petrec ele la nivelul nefronului.

Una dintre aceste ipoteze stabilește o corelație între cantitatea de Na⁺ reabsorbit cu volumul intratubular.

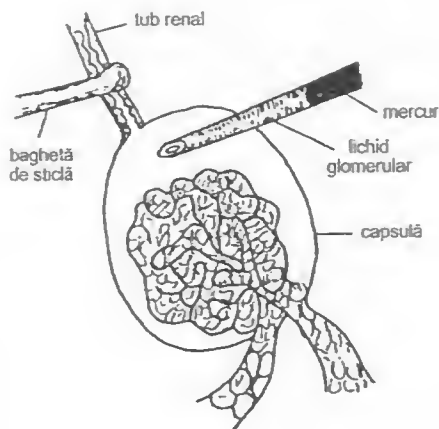


Fig. 11.35. Reprezentare grafică a micropuncției capsulei Bowman.

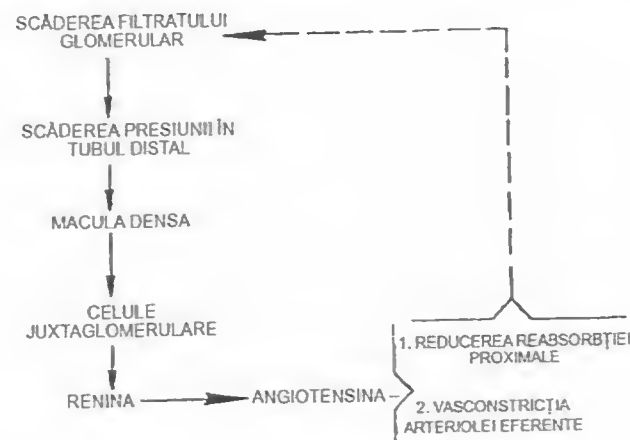


Fig. 11.36. Mecanismul de autoreglare a fluxului de filtrare glomerulară (Leyssac, 1966)

O altă ipoteză implică presiunea din interstițiul renal în realizarea unei reabsorbții variabile la nivelul tubului proximal.

Cele mai acceptate teorii admit existența unui mecanism de *feed-back* intrarenal. Factorul comun al tuturor acestor concepții este reprezentat de posibilitatea de modulare a funcției complexului juxtaglomerular prin mecanisme intratubulare. Divergențele între diferitele concepții constau în precizarea semnalului declanșator al acestui mecanism normal.

Unii cercetători cred că presiunea intratubulară distală ar reprezenta factorul determinant al funcționării mecanismului de *feed-back* intrarenal. Funcționarea acestui mecanism este reprezentat în fig. 11.36.

O consecință directă a acestei concepții este reprezentată de menținerea strict constantă a fracțiunii reabsorbite a filtratului glomerular în tubii proximali.

O serie de studii au precizat că, deși s-a dat o importanță deosebită factorilor nervoși și hormonal care asigură controlul rapid al volumului sanguin și al lichidului extracelular, cantități apreciabile de sodiu și apă pot fi eliminate în absența modificărilor semnificative ale mecanismelor nervoase și umorale cunoscute ca intervenind în reglarea funcției renale.

11.5.1. MECANISME FIZICE CARE INTERVIN ÎN REGLAREA FUNCȚIEI GLOMERULO-TUBULARE

Este cunoscut faptul că modificările presiunii coloidosmotice ale plasmelor determină modificări în sens invers ale presiunii interstițiale renale. Astfel, administrarea de soluție izotonică (încărcare salină izotonică) produce scăderea presiunii coloidosmotice a plasmelor și crește presiunea în interstițiul renal. În aceste condiții, scade reabsorbția tubulară a sodiului și a apei, urmată de natriureză și creșterea diurezei. Aceste răspunsuri, care pot să apară și în absența modificărilor presiunii de perfuzie renală, sunt cel mai bine explicate prin diluarea proteinelor plasmatice, cu reducerea, deci, a presiunii oncoteice și creșterea presiunii interstițiale renale.

Relația presiune arterială-natriureză-diureză. Triada funcțională PRESIUNE-NATRIUREZĂ-DIUREZĂ este o proprietate intrinsecă a rinichiului, deoarece se manifestă și la rinichiul izolat și perfuzat. Valori crescute ale presiunii arteriale ar putea determina o creștere a eliminărilor de sodiu și apă, independent de modificări măsurabile ale fluxului sanguin renal, ratei filtrării glomerulare (RFG) sau a fracției filtrate.

Studiile fiziologice din ultimii ani au contribuit la înțelegerea mecanismelor de corelație dintre acești trei parametri funcționali, care se pot modifica chiar și la creșteri de numai câteva procente ale RFG. Conform conceptului de echilibru glomerulo-tubular, creșterea RFG se însoțește de o creștere proporțională a ratei de reabsorbție tubulară. Orice creștere a ratei de sodiu și apă livrată porțiunii distale a nefronului pare să fie compensată prin creșterea reabsorbției tubulare în porțiunea groasă ascendentă a ansei Henle. Datele experimentale au precizat că alterările RFG mediate de presiune au o participare redusă în inducerea fenomenului presiune-natriureză-diureză. Pondereea cea mai mare în acest proces o are inhibarea reabsorbției tubulare a sodiului și a apei filtrate. Teoriile care au căutat să explice procesul presiune-natriureză-diureză și-au focalizat atenția asupra factorilor fizici care ar putea perturba reabsorbția de sodiu și apă în diferitele segmente tubulare.

S-a sugerat că ridicarea nivelului presiunii arteriale sistemice se transmite până la capilarele peritubulare, inhibând reabsorbția la nivelul tubului proximal, cu implicații în mecanismul presiune-natriureză-diureză. De altfel, au fost semnalate modificări fie ale presiunii hidrostatice, fie ale presiunii oncotice în capilarele peritubulare, care au avut ca urmare influențarea funcțiilor tubului proximal prin modificarea permeabilității epitelului acestui segment. Se știe însă că presiunea sângelui în capilarele peritubulare se modifică foarte puțin atunci când presiunea de perfuzie a rinichiului variază în limitele fenomenului de autoreglare, în timp ce excreția urinară este în mod evident afectată.

Creșterea excreției urinare s-a observat și în absența modificărilor sesizabile ale reabsorbției tubulare și/sau ale fluxului sanguin renal.

Nefronii juxtaglomerulari au o contribuție substanțială la răspunsul urinar. Astfel, reabsorbția în tubul proximal și/sau în ramul descendent al ansei Henle a nefronilor juxtamedulari este inhibată de creșterea presiunii în artera renală, în timp ce la nivelul porțiunii papilare a tubului colector s-a observat o creștere atât a reabsorbției fracționale, cât și absolute a clorului și a apei.

Explicarea modificărilor reabsorbției tubulare mediate de variațiile presiunale în porțiunea distală a nefronului au fost explicate astfel: creșterea presiunii arteriale determină și creșterea fluxului sanguin medular, ceea ce ar produce o scădere a gradientului osmolar cortico-medular.

Cercetări ulterioare nu au confirmat această ipoteză, dar au scos în evidență că, în absența unei autoreglări perfecte a fluxului sanguin papilar, presiunea din capilarele medulare (vasa recta) crește odată cu creșterea presiunii de perfuzie renală. Această creștere de presiune în ansele capilare renale ar inhiba *uptake*-ul lichidului din zona papilară și ar produce, astfel, creșterea presiunii hidrostatice interstițiale, care ar putea modifica reabsorbția tubulară a sodiului și a apei.

S-a observat, de asemenea, o reducere semnificativă a răspunsului presiune-natriureză-diureză după îndepărtarea capsulei renale, fără însă ca procesul respectiv să fie eliminat în totalitate. Se precizează astfel că răspunsul presiune-natriureză-diureză poate fi modulată de către nivelurile bazale ale presiunii hidrostatice interstițiale și că este în relație directă cu mărimea schimbărilor presiunale atunci când presiunea de perfuzie renală este crescută.

Măsurătorile simultane ale presiunii hidrostatice interstițiale din zonele corticală și medulară au arătat că în condițiile rinichiului intact (cu capsula sa inextensibilă prezentă), modificările presiunale sunt simultane, în timp ce la rinichiul decapsulat apare o disociere. Astfel, creșterea presiunii hidrostatice medulare, ca urmare a creșterii presiunii de perfuzie a rinichiului de la 105 la 145 mmHg, nu se însoțește de nici o modificare a presiunii hidrostatice interstițiale în zona corticală. Deci, ansele capilare drepte din medulară par să fie responsabile de nivelul presiunii interstițiale renale.

Modificările presiunii hidrostatice interstițiale din medulara renală ar putea, de asemenea, să explice răspunsul rezidual presiune-natriureză, observat pe rinichiul decapsulat. Aceste studii precizează că o creștere a presiunii interstițiale în zona corticală atunci când presiunea de perfuzie renală crește este consecința creșterii presiunii capilare în „vasa recta” papilare și a presiunii lichidului interstițial medular, efect care se transmite și în zona corticală. Acest proces ar putea explica creșterea presiunii interstițiale în zona corticală renală atunci când se produce o creștere a presiunii arteriale renale fără o modificare a

presiunilor hidrostatică și oncotică în capilarele peritubulare corticale. Astfel de modificări ar putea influența transportul sodiului și apei în tubul proximal prin alterarea „back-leak” și a reabsorbției pasive a ionilor, în timp ce creșterea presiunii în interstițiul medular ar modifica simultan reabsorbția tubulară în porțiunea descendentă a ansei Henle. Deci, răspunsul presiune-natriureză-diureză pare să fie mediat în cele din urmă în parte prin modificările de bemedinamică în zona medulară și ale presiunii hidrostatice a lichidului interstițial al rinichiului. Deocamdată, mecanismul prin care modificările presiunii hidrostatice a interstițiului renal afectează reabsorbția tubulară de sodiu și apă nu este explicat cu certitudine.

În afara teoriei „back-leak” de trecere paracelulară a sodiului și a apei, alți cercetători au sugerat că transportul activ de sodiu ar putea fi influențat prin modificări fizice ale geometriei celulelor tubulare renale. Semnalul ar putea fi pe cale chimică, reprezentat de activarea autoacizilor renali, care ar produce modificarea transportului activ. În același sens s-a arătat că inhibitorii ai sinizei de prostaglandine ar reduce natriureza determinată prin creșterea directă a presiunii hidrostatice renale.

11.5.2. INTERACȚIUNI NERVOASE ȘI UMORALE CU MECANISMUL PRESIUNE-NATRIUREZĂ-DIUREZĂ

Interacțiuni nervoase. O serie de date experimentale au scos în evidență posibilități de influențare a răspunsului presiune-natriureză-diureză atât prin mecanisme nervoase, cât și umorale. Astfel, în urma clampării carotidelor și a perfuziei cu noradrenalină apare evident răspunsul natriuretic și de creștere a diurezei. Acest răspuns este însă mai redus decât acela observat prin modificările presiunii de perfuzie a rinichiului, apărute ca o consecință a manevrelor mecanice de clampare a aortei. Denervarea acută renală modifică semnificativ relația dintre excreția de sodiu și presiunea de perfuzie a rinichiului la șobolani cu hipervolemie. Creșterea tonusului simpatic renal determină o reducere evidentă a răspunsului „presiune-natriureză-diureză”.

Sistemul renină-angiotensină-aldosteron. Depleția sodată și hidrică stimulează secreția de renină, urmată de creșterea consecutivă a nivelului circulant al Ang II, ceea ce induce o creștere a secreției de aldosteron. În consecință, angiotensina II modifică reabsorbția tubulară de sodiu atât direct (efect antinatriuretic), cât și indirect (alterarea bemedinamicii renale), prin modificarea forțelor hidrostatice și oncotice din capilarele peritubulare. Deci, modificările reabsorbției proximale a sodiului și ale rezistenței vasculare renale acționează confluent în vederea scăderii capacității rinichiului de a elimina Na^+ și apă. În același timp, aldosteronul își exercită efectele atât la nivelul tubului colector, cât și la nivelul tubului distal, unde crește reabsorbția netă de sodiu și reduce „back-leak”-ul sodiului.

Prostaglandinele. Se știe că rinichiul este implicat major în metabolismul derivaților acidului arahidonic. PGE_1 sintetizată în corticala renală se pare că intervine în elaborarea reninei ca răspuns la scăderea presiunii de perfuzie renală.

La rândul lor, prostaglandinele PGE_2 sunt sintetizate de celulele interstițiale și cele ale tubului colector. Se pare că sinteza lor este stimulată de Ang II. Atât PGE_1 , cât și PGE_2 au acțiuni vasodilatatoare și este posibil să reprezinte sistemul vasodilatator care să contracareze efectele vasoconstrictoare ale tromboxanului A_2 . Ang II și ale altor amine biogene la nivelul vaselor renale și în sectorul vascular extrarenal.

Activitatea PGE_2 și a PGF_{2m} pare să varieze în funcție de balanța sodiului. PGE_2 inhibă efectele hidrostatice ale vasopresinei, stimulând excreția apei libere. PGE_2 inhibă, de asemenea, reabsorbția sodiului și/sau a clorului la nivelul porțiunii groase a ramului ascendent și la nivelul porțiunii corticale a tubului colector. Atât PGE_2 , cât și PGF_{2m} inhibă reabsorbția ureei de-a lungul tubului colector.

În plus, s-a evidențiat faptul că răspunsul presiune-natriureză-diureză se acompaniază de o creștere a excreției urinare de PGE_2 .

Date recente au precizat că prostaglandinele renale ar modula răspunsul presiune-natriureză prin modificarea presiunii hidrostatice interstițiale datorită variațiilor rezistenței vaselor medulare.

Sistemul kininelor. Sistemul kininelor biologic active se pare că influențează distribuția fluxului sanguin renal, precum și excreția de apă și electroliți, acționând ca hormon paracrin. Bradikina are efect natriuretic prin acțiune predominantă la nivelul tubului colector.

11.6. LUCRUL RINICHIULUI

Pentru îndeplinirea funcțiilor proprii, celulele renale efectuează un lucru care implică cheltuială de energie.

Lucrul rinichiului a putut fi calculat în mod indirect prin consumul de oxigen al acestuia și care la om este de 10 cm³ oxigen/minut. Acest consum traduce o cheltuială de energie de circa 60–180 cal/24 de ore, adică 1/12 din metabolismul bazal, consum foarte ridicat dacă îl raportăm la greutatea rinichilor și care nu reprezintă decât 0,7% din greutatea corporală.

11.7. REGLAREA FUNCȚIEI RENALE

Cantitatea de urină produsă de rinichi în 24 de ore ca, de altfel, și concentrația diferitelor substanțe solvate variază în limite foarte largi.

Aceste variații de necesitate se produc datorită intervenției a numeroși factori, care își manifestă acțiunea fie pe cale nervoasă, fie prin intermediul unor substanțe umorale.

Influențele nervoase și hormonale se exercită de cele mai multe ori în mod conjugat asupra rinichiului.

11.7.1. MECANISMELE NERVOASE DE REGLARE A FUNCȚIEI RENALE

Intervenția factorilor nervoși în modificarea funcției renale a fost observată încă de multă vreme în cazul anumitor stări comatoase însoțite de anurie sau, din contră, de poliurie.

În 1858, Cl. Bernard a provocat, prin puncția bulbului rahidian, poliurie (însoțită de albuminurie sau de glicozurie) sau anurie în funcție de nivelul la care s-a practicat puncția. O serie de alte cercetări ulterioare demonstrează rolul sistemului nervos vegetativ asupra rinichiului. Descrierea diverselor reflexe viscero-renale, sau reno-renale, influența reflex-condiționată a scoarței cerebrale vin să completeze capitoul atât de complex al acțiunilor nervoase asupra activității rinichiului.

Intervenția sistemului nervos vegetativ asupra activității renale se manifestă prin efecte vasomotorii. Excitarea pediculului renal provoacă vasoconstricție în sistemul arterial și scăderea debitului venos al rinichiului. Secționarea lui provoacă vasodilatație și mărirea diurezei.

Sistemul nervos vegetativ intervine în modificarea diurezei și în alt mod. S-a observat că, în timpul diurezei normale, numai o jumătate din totalul glomerulilor este permeabilă circulației, cealaltă jumătate rămânând rând pe rând inactivă. Această alternanță funcțională glomerulară a fost denumită „tur de serviciu”. Acest fenomen poate fi influențat de agenți farmacodinamici. Cafeina deschide un număr mai mare de glomeruli, având drept rezultat poliuria consecutivă, iar adrenalina scoate din circulație până la 95% din glomeruli, determinând oligurie prin vasoconstricția realizată.

De asemenea, excitarea splanhnicului exclude glomerulii prin vasoconstricția arteriolei aferente, iar secționarea sa suprimă alternanța glomerulară, mărind numărul glomerulilor activi. Interesant de remarcat este faptul că după un timp variabil de la secționarea splanhnicului, intermitența funcțională glomerulară reapare, probând astfel existența unei vasomotricități autonome renale.

Deci, sistemul nervos vegetativ intervine în reglarea funcției rinichiului prin jocul vasomotor, care controlează variațiile presiunii sanguine intraglomerulare ale fluxului sanguin glomerular și, implicit, ale diurezei.

11.7.2. MECANISMELE HORMONALE DE REGLARE A FUNCȚIEI RENALE

Intervenția glandelor endocrine în activitatea renală se manifestă îndeosebi asupra mecanismelor prin care rinichiul participă la menținerea balanței hidrosaline corecte a organismului. Acțiunea diferiților

hormoni (ADH, Aldo, ANF etc.) se exercită fie direct la nivelul rinichiului, fie indirect, prin modificarea factorilor care reglează distribuția și mișcarea apei și electrolitelor în organism.

Extracțele de hipofiză posterioară conținând ADH exercită o acțiune oligurică. Acțiunea antidiuretică a ADH rezultă în urma creșterii reabsorbției de apă în segmentul distal al nefronului (tub distal și tub colector). Este vorba de reabsorbția facultativă, care reprezintă în medie 15% din filtratul glomerular. Deci, ADH intervine în ajustarea cantității de apă care trebuie eliminată din organism.

De reînțarcat că numai la om hormonul antidiuretic (vasopresina) intervine în reabsorbția tubulară de apă, la reptile aceasta influențează filtrarea glomerulară, iar la păsări influențează atât filtrarea, cât și reabsorbția apei.

Mecanismul prin care ADH crește reabsorbția de apă este încă discutat. Unii cercetători susțin ipoteza că ADH ar acționa prin intermediul hialuronidazei. Această enzimă, acționând asupra mucopolizaharidelor structurale, ar determina depolarizarea acestora și, astfel, ar crește permeabilitatea pentru apă a peretelui tubular.

Alți cercetători au pus în evidență că vasopresina acționează prin legarea de receptori specifici de la nivelul membranei celulelor-țintă.

S-au descris două subtipuri de receptori pentru vasopresină: receptori V₁-vasculari, evidențiați pe membrana fibrelor musculare netede din structura arteriolelor, hepatocite, trombocite, medulosuprenală, adenohipofiză, și receptori V₂, prezenți în membrana porțiunii terminale a tubului distal și a tubilor colectori.

Legarea vasopresinei de receptori V₁ este urmată de activarea fosfolipazei C-membranare, care sumulează producerea intracitoplasmatică de 1,2-diacilglicerol și de 1,4,5-inozitol trifosfat, urmată de activarea protein kinazei C și mobilizarea Ca²⁺ intracelular. Creșterea concentrației Ca²⁺ intracelular determină activarea calmodulin kinazei, urmată de suita de procese finalizate prin răspuns celular.

La nivelul tubului renal, cuplarea vasopresinei (hormonului antidiuretic) cu receptori de tip V₂ este urmată de activarea adenilat ciclazei, care determină creșterea concentrației intracitoplasmatic de 3',5'-cAMP ce activează protein kinaza A. La rândul ei, protein kinaza A activată determină fosforilarea actin-binding proteinei, a vilinei și eliberarea de ioni de calciu, efecte urmate de agregarea canalelor de apă de la suprafața luminală a tubului urinifer și creșterea reabsorbției de apă.

O varietate complexă de stimuli este capabilă să influențeze hipotalamusul care, printr-un mecanism tensio-osmoreglator, menține la valori constante echilibrul hidroelectrolitic al organismului în vederea eliberării de ADH retrohipofizar în circulația sanguină (fig. 11.37).

Corticosuprenala reprezintă de asemenea o glandă cu secreție internă care intervine în mare măsură în reglarea funcțiilor rinichiului.

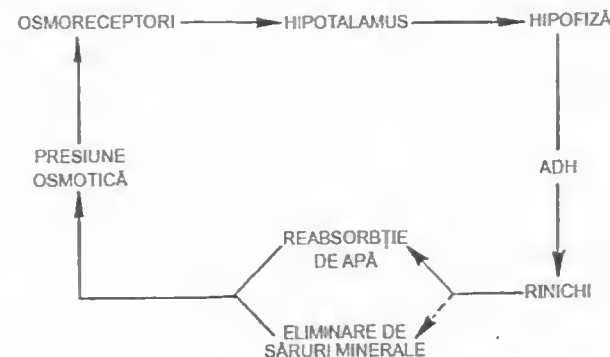


Fig. 11.37. Intervenția hormonului antidiuretic în mecanismul de reglare a funcției renale.

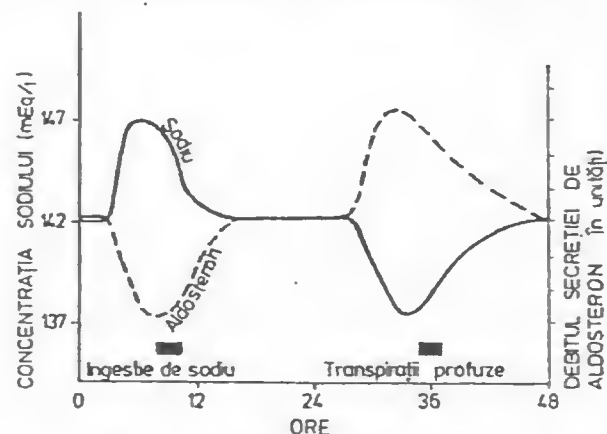


Fig. 11.38. Interrelații între nivelul sodiului plasmatic și secreția de aldosteron.

Toți steroizii corticosuprarenali, dar în special mineralocorticoizii intervin în reglarea funcției renale. Dintre aceștia, mai bine cunoscuți sunt deoxicorticosteronul (DOC) și aldosteronul, denumit și electrocortină sau corticoid electrolitregulator. Cel mai activ hormon este aldosteronul, care la nivelul rinichiului are acțiune de 100 de ori mai puternică decât DOC.

De remarcat că aldosteronul reduce eliminarea de Na^+ și crește pe aceea de K^+ la nivelul rinichiului, glandelor sudoripare, glandelor salivare etc.

Aldosteronul eliberat în circulație își manifestă acțiunea cu precădere la nivelul tubului distal, stimulând, așa cum s-a precizat în paginile anterioare, reabsorbția Na^+ din urină în celula tubulară și eliminând K^+ în lumenul tubului. Se pare că aldosteronul nu acționează numai la nivelul tubului distal, întrucât s-a observat facilitarea transportului de Na^+ și în segmentul proximal și chiar în tubul colector (fig. 11.38).

Efectele aldosteronului la nivelul celulei tubulare se realizează după cuplarea prealabilă cu receptori din teritoriul celular – *ipoteza inducției*.

Există și alte păreri cu privire la modalitățile de realizare a efectelor aldosteronului. Unii cercetători presupun că mineralocorticoizii ar determina creșterea permeabilității polului apical al celulei epiteliale pentru ionul de sodiu prin deschiderea unor canale de sodiu și, astfel, ar facilita contactul său cu pompa – *teoria permeazelor*.

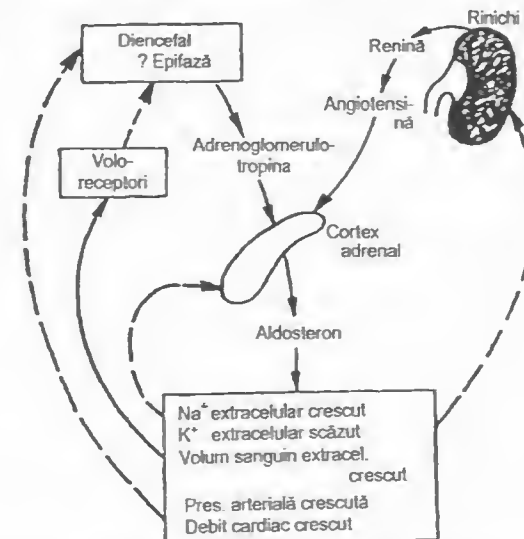
Alți autori presupun un efect de creștere a activității pompei de sodiu și stimularea sintezei sau activării Na^+ , K^+ -ATPazei.

Și, în sfârșit, o altă teorie susține că aldosteronul și-ar manifesta acțiunea prin activarea uneia sau mai multor etape metabolice cu rol în stimularea sintezei de ATP. În acest mod, aldosteronul ar determina creșterea concentrației materialului energetic necesar pentru funcționarea pompei.

După unii autori, glanda suprarenală este stimulată în vederea secreției de mineralocorticoizi, în afara ionilor de Na^+ , K^+ , a sistemului renină-angiotensină și ACTH și de către un factor eliberat de epifiză denumit adrenoglomerulotropină (fig. 11.39).

În reglarea activității renale, un rol deosebit îl au și peptidele natriuretice. Evidențiată pentru prima dată în cardiomiocitele atriale, sinteza factorului natriuretic atrial (ANF) a fost identificată apoi și în sistemul nervos și chiar în rinichi. Aceste peptide, cu structură și denumire diferite în funcție de locul de sinteză, intervin în principal în homeostazia hemodinamicii organismului. Intervenția peptidelor natriuretice în procesul amintit se realizează, pe de o parte, prin implicarea lor în mecanismele de reglare a metabolismului hidroelectrolitic, iar, pe de altă parte, prin variații ale tonusului vascular.

Fig. 11.39. Mecanisme posibile de reglare a secreției de aldosteron.



Departate de a fi elucidate toate implicațiile sistemului de peptide natriuretice în economia funcțională a organismului, se admite până în prezent că cele mai importante roluri s-ar rezuma la:

- inhibarea secreției de vasopresină de la nivelul neurohipofizei;
- relaxarea musculaturii netede;
- inhibarea reabsorbției Na^+ și apei la nivelul tubului urinifer;
- inhibarea secreției de renină la nivelul aparatului juxtaglomerular renal;
- scăderea sintezei de aldosteron de către celulele zonei glomerulare a glandei corticosuprarenale.

Prin aceste efecte, peptidele natriuretice realizează o scădere a volumului și presiunii sanguine ca urmare a creșterii diurezei, eliminărilor de sodiu și alor electroliți, precum și a vasodilatației arteriole.

Peptidele natriuretice pot influența funcția renală atât prin acțiuni la nivelul polului glomerular, cât și al celui tubular al nefronului. Efectele glomerulare se materializează prin creșterea filtrării glomerulare, atât prin creșterea coeficientului de ultrafiltrare la nivelul capilarelor glomerulare, cât și prin modificări adecvate ale rezistenței arteriolelor aferente și eferente.

La nivelul polului tubular, ANF afectează transporturile transtubulare de apă și electroliți atât la nivel proximal, cât și în porțiunea medulară a canalului colector.

În condiții bazale, reabsorbția de apă și sodiu este modificată de către ANF în mod indirect, prin inhibarea efectelor angiotensinei II la nivelul tubului proximal. De asemenea, ANF determină creșterea eliminărilor de Na^+ și apă prin acțiune la nivelul porțiunii terminale a nefronului. Excreția renală de apă este influențată prin inhibarea reabsorbției sale indusă de vasopresină la nivelul tubului colector.

Inhibarea reabsorbției de Na^+ se realizează prin intermediul receptorilor specifici. S-au descris până în prezent trei tipuri de receptori specifici. Mesagerul secund este cGMP, care influențează reabsorbția electrogenă de Na^+ , reducând probabilitatea de deschidere a canalelor cationice la nivelul polului luminal al membranei celulei tubulare. cGMP odată format blochează canalul cationic și, respectiv, reabsorbția de Na^+ prin două mecanisme:

- o posibilitate de inhibare a canalelor s-ar realiza printr-un mecanism independent de fosforilări, fixându-se fie pe situsul de modificare alosterică a canalului, fie pe o subunitate reglatoare;
- o altă posibilitate de blocare a canalelor cationice s-ar realiza prin activarea protein kinazei cGMP-dependente, care pe o cale secvențială implică proteina Gi-GTP.

Aceste mecanisme cGMP-dependente inhibă reabsorbția de sodiu la nivelul caoalului colector din medulara internă și explică în mare parte natriureza observată după creșterea nivelului plasmatic de ANF.

În afara hormonului antidiuretic, aldosteronului și peptidelor natriuretice, numeroși alți factori hormonalți intervin secundar în reglarea hidroelectrolitică, începând cu glucocorticoizii și sfârșind cu hormonii tiroidieni și sexuali. Unii cercetători presupun existența unui hormon diuretic eliberat de către hipofiza anterioară. Totuși, nu s-a izolat un principiu specific, capabil să contrabalanseze acțiunea hormonului antidiuretic. Puterea diuretică a extractelor de hipofiza anterioară rezultă probabil din acțiunea conjugată a mai multor hormoni pe care îi conține. Insulina scade pragul renal de eliminare a glucozei, iar adrenalina în doze mici crește fluxul de filtrare glomerulară, în timp ce în doze mari fluxul scade.

Parathormonul, prin efectele sale renale, intervine în menținerea echilibrului fosfo-calcic. Administrarea parathormonului la om determină creșterea rapidă a excreției urinare de fosfat, sodiu, potasiu și bicarbonat și scăderea eliminării de calciu, magneziu, ioni de hidrogen, amoniac. Cel mai evident efect al parathormonului este de stimulare a excreției ionului fosfat. Hormonul paratiroidian și-ar realiza acțiunea prin două mecanisme: pe de o parte, prin inhibiția reabsorbției proximale a fosfaților, iar pe de altă parte prin stimularea secreției acestui ion.

Parathormonul crește capacitatea renală de reabsorbție a calciului, acționând la nivelul ramurii ascendente a ansei Henle și tubului contort distal. Parathormonul crește, de asemenea, și reabsorbția tubulară a magneziului la nivelul segmentului larg al brațului ascendent al ansei Heale. Dar, administrarea cronică de parathormon ou se însoțește de hipermagneziemie, probabil datorită hipercalcemiei asociate, care inhibă reabsorbția tubulară renală de magneziu.

Rolul parathormonului în reglarea fiziologică a magneziemiei pare să fie astfel mai puțin important. Deși secreția de parathormon este stimulată acut de către scăderea magneziului plasmatic, ea este de aproximativ trei ori mai puțin importantă decât în cazul calciului în cantități echimolare.

Parathormonul își realizează efectele prin acțiune metabolică directă la nivelul celulei epiteliale tubulare. Există receptori pentru parathormon la nivelul membranei celulelor epiteliale ale tubului proximal. Prin interacțiunea parathormon – receptori specifici membranari se activează sistemul adenilic ciclază – 3'5'-cAMP, care realizează efectele menționate. Concomitent, are loc și o eliminare parțială a cAMP în urină, prezența sa fiind considerată ca o dovadă a activității paratiroidiene.

Calcitonina stimulează moderat reabsorbția tubulară de calciu la nivelul ansei Heale și al tubului distal. Și acest hormon acționează la nivelul rinichiului prin intermediul unor receptori membranari specifici, activând sinteza de cAMP intracelular.

În acțiunea sa la nivelul rinichiului, parathormonul se găsește în strânsă corelație cu vitamina D. Este știut faptul că vitamina D₃ (colecalciferolul), forma absorbită la nivelul intestinului, nu este activă asupra metabolismului fosfo-calcic. Forma activă prezintă doi oxidrii în pozițiile 1 și 25. Hidroxilarea colecalciferolului în poziția 25 se face la nivelul ficatului, iar a doua hidroxilare (în poziția 1) se realizează de către rinichi. Transformarea 25-hidroxicolecalciferolului de către rinichi este controlată indirect de valoarea echilibrului fosfo-calcic și nemijlocit de parathormon. În acest context, numeroși fiziologi atribuie parathormonului rolul de „stimulină” a sintezei de 1,25(OH)₂D₃. Această acțiune a parathormonului se realizează prin intermediul efectului de stimulare a eliminării fosfaților la nivel renal. Scăderea concentrației plasmatice a fosfaților stimulează sinteza de 1,25(OH)₂D₃ la nivelul cortexului renal.

Vitamina D₃ devine activă după hidroxilarea renală în poziția 1, favorizează reabsorbția tubulară de calciu. Efectele 1,25(OH)₂D₃ asupra reabsorbției de calciu la nivelul tubului urinifer sunt directe și se realizează prin intermediul receptorilor specifici, prezenți în celulele tubului distal.

11.8. EXPLORAREA FUNCȚIILOR RINICHIULUI

Pentru explorarea stării funcționale a rinichiului se descriu o multitudine de metode și tehnici.

Unele dintre aceste metode oferă date asupra funcțiilor renale în ansamblu, probele indirecte, care se referă la examenul de urină și examenul de sânge și care oferă indicații asupra capacității rinichiului de menținere a: izotoniei, izovolemiei și a concentrației plasmatice normale a produșilor de catabolism proteic.

Există însă și metode directe de explorare a uneia din funcțiile rinichiului:

- explorarea fluxului plasmatic renal;
- determinarea filtratului glomerular;
- explorarea reabsorbției tubulare;
- studiul excreției (secreției) active;
- proba de diluție și concentrare etc.

11.8.1. METODE INDIRECTE DE EXPLORARE A FUNCȚIILOR RINICHIULUI

Examenul de urină. Urina este produsul final al activității excretorii a rinichiului și conține resturi ale metabolismului intermediar proteic și săruri solvite în apă, care sunt eliminate din organism ca rezultat al funcției rinichiului de menținere constantă a homeostaziei hidroelectrolitice a mediului intern.

Pentru explorarea stării funcționale a rinichiului și pentru diagnosticul unei nefropatii, examenul de urină este indispensabil.

Introducerea unor noi metode de explorare funcțională a rinichiului prin tehnicile cantitative – testul Addis-Hamburger, electroforeza și imuno-electroforeza proteinelor din urină, ca și determinarea activității enzimelor urinare în nefropatii au făcut să crească și mai mult valoarea diagnostică a examenului de urină.

Examele urinei trebuie să înceapă cu studiul ei macroscopic: volumul, transparența, culoarea, mirosul, densitatea etc. Este, deci, vorba de examenul fizic al urinei.

Volumul de urină – diureza: cantitatea de urină eliminată în decursul a 24 de ore poartă numele de diureză și are o valoare de 900–1500 ml. Urina obligatorie este de 500 ml/24 h, restul de urină (400–1000 ml) reprezintă urina facultativă. Volumul de urină variază în condiții fiziologice, în plus sau în minus, în funcție de cantitatea de lichide ingerate, efortul fizic depus, temperatura mediului ambiant, stări emoționale etc.

Regimurile bogate în lichide pot crește diureza până la 2000 ml/24 h și chiar mai mult, un efect invers observându-se în condițiile în care aportul lichidian este scăzut. Efortul fizic intens, însoțit de transpirații abundente determină o scădere a diurezei. Temperatura ambiantă scăzută prin vasoconstricție periferică mobilizează o mare parte din sângele existent în plexurile subpapilare și determină o creștere a volumului de urină. Un efect invers, de scădere a diurezei, apare în condițiile unor temperaturi ridicate în ambianță. Prin mecanism conjugat, efortul fizic desfășurat în condiții de ambianță termică ridicată poate să inducă perturbări hidroelectrolitice însoțite de oligurie, retenție azotată etc.

Modificări ale diurezei furnizează indicații importante și pentru diagnosticul bolilor de rinichi. Creșterea cantității de urină eliminată este cunoscută sub numele de poliurie, scăderea diurezei – oligurie, iar lipsa de formare a urinei – anurie.

Transparența: urina normală și proaspăt emisă este limpede și transparentă. În anumite stări patologice, urina este tulbură, așa cum se întâmplă în piurie sau bacteriurie sau când se elimină o cantitate mare de urați și oxalați. În glomerulonefrita acută, urina are aspect de bulion de carne.

Culoarea urinei este galben-verzuie, datorită prezenței urocromului și urobilinei. În general, urina de dimineață este mai închisă la culoare decât în cursul zilei. Stările patologice modifică adeseori culoarea urinei. Astfel, în glomerulonefrita urina devine sanguinolentă datorită prezenței sângelui care imprimă culoarea roșie. În sindroamele icterice urina este închisă (culoare brună), datorită prezenței în cantitate mare a pigmentilor biliari, iar în sindroamele nefrotice urina devine lactescentă.

Densitatea urinei variază între 1 015–1 022. Aceste variații se datoresc capacității rinichiului de a dilua sau concentra urina pe seama eliminării unor cantități mai mari sau mai mici de apă și substanțe solvite.

În timpul ingestiei de lichide, densitatea scade în jurul cifrei de 1 010, iar pe parcursul probei diluției ea ajunge chiar până la 1 003–1 001.

Prânzurile uscate cresc densitatea urinei peste 1 022, iar în cazul probei de concentrare poate să ajungă la 1 028–1 030.

Rinichiul sclerotic își pierde capacitatea de diluție și concentrare a urinei, eliminând o urină cu densitate aproape constantă (1 009–1 011) – izostenurie.

Reacția urinei este variabilă în funcție de regimul alimentar și de diferitele momente ale zilei în care s-a făcut recoltarea. Emisiile din cursul dimineții au un pH mai fix. În cazul unei alimentații mixte, urina are un pH acid (6,2–6,6). Ca urmare a unei alimentații carnată pH-ul variază între 5,2–5,3, pentru ca un regim eminent vegetarian să deplaseze pH-ul spre alcalinitate (7–7,5). La tineri, pH-ul urinar este mai alcalin. Din contră, în timpul iernii, datorită consumului sporit de alimente conservate, pH-ul este mai acid.

Mirosul este caracteristic datorită substanțelor aromatice și amoniacului.

Compoziția urinei. Aceasta diferă mult de a plasmă. În primul rând, urina nu conține proteine și glucoză. Conține 950 ml apă la litru de urină, iar restul de 50 ml apă la litru este reprezentat prin substanțe organice și anorganice.

Substanțele organice prezente în urină sunt în marea lor majoritate produși rezultați în urma metabolismului celular.

Ureea se elimină prin urină în timp de 24 de ore în cantitatea de 25 g. După cum se poate observa, concentrația ureei în urină este de aproape 60–80 de ori mai mare decât în plasma sanguină.

Acidul uric se elimină în cantitate de 0,6–0,7 g în timp de 24 de ore. După cum se știe, concentrația plasmatică a acidului uric variază între 2–4 mg/dl, așa încât se observă o concentrare foarte intensă și a acestui produs de eliminare în urină față de plasmă.

Creatinina este, de asemenea, în concentrație mult mai mare în urină (100 de ori), ea eliminându-se în cantitate de 1–2 g/24 de ore.

Acizii aminați se elimină prin urină aproximativ 0,35–0,50 g în 24 de ore. De asemenea, prin urină se elimină: acid oxalic, acid citric, acid beta-oxibutiric, ca atare sau sub formă de săruri etc.

Pigmenții urinari sunt urocromul (0,3 g/24 h) și urobilina (25 mg/24 h).

Tot prin urină se elimină: vitamine (vitamina C, când aceasta se administrează în exces, vitamine din complexul B), enzime (lactic dehidrogenază), acidul vanilmandelic, estrogenii, 17-cetosteroidii etc. Dozarea lactic dehidrogenazei în urină reprezintă un test de explorare a funcției renale.

În cadrul **substanțelor anorganice**, constituenții principali sunt reprezentați de cloruri, care se elimină în cantitate de 12–15 g/24 h. Dintre acestea, NaCl deține ponderea cea mai mare, eliminându-se zilnic în cantitate de 10–12 g.

Sulfatii se elimină ca atare sau sub formă de produși sulfoconjugați și indican, în cantitate de 2 g/24 h. Fosfații se elimină 1,5 g/24 h, amoniaciul 0,7 g/24 h, fiind de 400 de ori mai concentrat decât în plasmă. Sodiul se elimină 3–5 g/24 h, potasiul 2–3 g/24 h, concentrație de aproximativ 10 ori mai înaltă decât în plasmă.

Calciul se elimină 0,2 g/24 h, magneziul 0,1 g/24 h și, de asemenea, carbonați și bicarbonați, în funcție de necesitățile de moment ale organismului.

Sedimentul urinar. Examenul urinei trebuie completat întotdeauna cu urmărirea la microscop a sedimentului urinar. Examenul se execută din urina proaspătă, după centrifugare (5 minute de 2 000 rotații/mm).

În sedimentul urinar se pot întâlni elemente de origine celulară – hematii, leucocite, epitelii, cilindri de precipitare, diferite cristale, microorganisme etc.

Se admite că prezența hematiilor în urină indică existența unui proces patologic la nivelul rinichiului, pentru că, în general, hematiile lipsesc în sedimentul subiecților normali.

Leucocitele sunt prezente în urină. Chiar în cazul sedimentului normal numărul acestora variază între 1–10 pe un câmp microscopic. În condiții patologice, numărul leucocitelor crește peste 10 până la 15 și mai mult pe câmpul microscopic.

Celulele epiteliale apar în condiții normale de la nivelul căilor urinare. Creșterea numărului lor ată, de regulă, o inflamație catarală, descuamativă la nivelul căilor urinare.

Cilindrii iau naștere în tubii uriniferi prin cnagulara substanțelor prezente în tubi și reprezintă adevărate mlaie ale acestora. În marea majoritate a cazurilor, cilindrii sunt consecința precipitării de proteine. Aceștia poartă numele de cilindri hialini în care, eventual, au fost incluse sau de care au aderat hematii (cilindri hematici), leucocite (cilindri leucocitari), celule epiteliale intacte (cilindri epiteliali) sau eventual degenerate granular (cilindri granuloși sau grăsoși) etc.

Cristalele de oxalați, fosfați, carbonați, acid uric pot apărea și în urina normală în condiții de reducere a diurezei sau de aport alimentar dezechilibrat (exces de ciocolată, viscere, făinoase, spanac etc.). Eliminarea abundentă de cristale prin urină la un subiect cu diureză normală și dietă echilibrată este aproape întotdeauna patologică.

În urină pot fi prezente și microorganisme. Pentru punerea în evidență a acestora, urina trebuie colectată aseptice. Decelarea microorganismelor pe frotiul colorat obținut din sedimentul urinar (albastru de metilen, Gram, Ziehl) se cere completată prin examene bacteriologice de specialitate.

Punerea în evidență și determinarea elementelor sedimentului urinar se face mai exact prin proba Addis. Se recoltează urina din 12 ore (24 de ore), se centrifughează (după o prealabilă omogenizare) 10 ml din aceasta la 1 600 rotații/min timp de 10 minute și se îndepărtează 8,9 sau 9,5 ml din supernatant, concentrând astfel sedimentul de 5–10–20 de ori. Se numără apoi elementele (hematii, leucocite, celule, cilindri) pe hemocitometru.

Hamburger a modificat tehnica, calculând eliminarea elementelor respective în timp de un minut. Pentru ușurarea calculului diurezei pe minut se poate face recoltarea urinei într-un interval de 100 de minute.

După tehnica Addis se elimină în medie: 500 000 de hematii, 1–2 milioane de leucocite, 5 000 de cilindri în 24 de ore.

Conform metodei propuse de Hamburger, fluxul de eliminare al elementelor celulare este: hematii 0–100/min; leucocite 0–500/min; cilindri 0–7/min.

Examenul sângelui. Studiul modificărilor proteinelor serice, ca de altfel și dozarea substanțelor azotate neproteice (uree, creatină, creatinină, acid uric etc.) conținute în plasma sanguină constituie un indicator util în aprecierea funcției rinichiului.

Scăderea proteinelor plasmatică este cauzată uneori de pierderea lor pe cale urinară.

Proteinemia mai mică de 6–7 g/dl de plasmă determină scăderea presiunii coloidosmotice a sângelui. Datorită acestui fapt, apa interstițială trece cu greutate și nu în totalitate la nivelul capătului venos al capilarului, generând edemele. De fapt, edemul reprezintă una din primele manifestări de suferință renală. Edemul renal se caracterizează prin aspectul generalizat, este moale, alb și nedureros.

Atunci când capacitatea funcțională a rinichiului este îngrădită, eliminarea substanțelor de excreție, rezultate în urma proceselor metabolice din organism, cât și a substanțelor străine nu se mai face în condiții normale, acestea fiind reținute în sânge și, în consecință, crește concentrația lor serică.

Dintre produșii finali ai metabolismului proteic, ureea reprezintă principalul compus azotat neproteic din sânge. În mod normal, concentrația ureei în sânge este de 20–40 mg/dl. Creșterea concentrației ureei în sânge reprezintă semnul cel mai fidel al insuficienței renale. De altfel, mărirea acestor creșteri permite să se aprecieze gravitatea bolii.

Valnurile ureei pot să crească peste 1 g/l, ajungând chiar la 4–5–10 g/l, stare ce poartă numele de uremie. Valorile ureei sanguine sunt crescute într-o serie de boli renale: glomerulonefrită acută, glomerulonefrită cronică, pielonefrită, nefropatie lupică, insuficiență renală, sau în boli ale altor organe care interesează și rinichiul, cum sunt hipertensiunea arterială malignă, hipertensiunea arterială primitivă stadiul III etc.

În condiții normale, concentrația serică a *creatininei* este constantă, nefiind influențată de aportul alimentar, de diureză sau de efort. Ea se cifrează la valorile de 0,6–1,3 mg/dl. Constanța nivelului seric al creatininei arată originea sa strict endogenă (din creatină și fosfagen). Creatinina crește în sânge înaintea creșterii ureei sanguine, fiind un indicator mai fidel al afectării funcției rinichiului.

Rezerva alcalină (RA) reprezintă un important indicator asupra funcției renale. În mod normal, valoarea RA este de 50–60 vol. CO₂% ml sânge.

Când funcția respiratorie este normală, scăderea rezervei alcaline indică tendința la acidoză, în timp ce creșterea ei denotă o stare de alcaloză, ca urmare a imposibilității de eliminare pe cale renală a corpurilor acizi sau bazici. Ambele stări pot fi întâlnite mai ales în insuficiența renală.

TABELUL 11.11

Exprimare comparativă a compoziției chimice a plasmei și urinei

Elemente	Plasmă	Urină	Conc. urină / conc. plasmă
	g/l	g/l	
Proteine	70	0	60-70
Uree	0,20-0,40	15-30	0
Acid uric	0,045	0,09-1,6	2-40
Creatinină	0,01	0,8-1,20	80-120
Acizi aminați	0,5	0,8-1	1-2
Bilirubină	0,005	0	0
Glucoză	1	0	0
Cholesterol	1,5-2,3	urme	0
Na ⁺	3,3	3-6	1-2
K ⁺	0,19-0,21	2-3	10-15
Mg ²⁺	0,018-0,020	0,10	5
Ca ²⁺	0,1	0,1-0,3	1-3
Cl ⁻	3,65	5-7	1-2
CO ₃ H ⁻	1,65	0	0
PO ₄ ³⁻	0,045	1,4-3,5	30-80
SO ₄ ²⁻	0,1	1-1,5	10-15
(NH ₄) ⁺	0,001-0,002	1-3	1 000-2 000

Ianograma dă informații separate asupra concentrației fiecărui ion din plasmă. Determinarea principalilor electroliți în umorile organismului are o deosebită importanță teoretică și practică în domeniul nefropatiilor, având în vedere rolul deosebit al rinichiului în menținerea echilibrului hidroelectrolitic (tabelul 11.11).

11.8.2. METODE DIRECTE DE EXPLORARE A FUNCȚIILOR RINICHIULUI

Așa după cum se știe, rinichiul își realizează funcția sa de menținere a homeostaziilor organismului prin punerea în joc a unor mecanisme funcționale, din care cele mai importante sunt:

- o adecvată irigație renală;
- un proces eficient de filtrare glomerulară;
- o reabsorbție selectivă și activă la nivelul tubilor;
- o secreție activă;
- mecanismul de diluție și concentrare a urinei.

Există astăzi metode care dau posibilitatea să se aprecieze cantitativ fiecare din aceste mecanisme funcționale, diferiții factori care reglează aceste procese, ca, de altfel, și lanțul de fenomene prin care ele se realizează.

Majoritatea probelor funcționale renale directe se bazează pe principiul *clearance*-ului. Altele cercetează influența exercitată de factorii care în mod normal controlează respectivul mecanism funcțional sau influența exercitată de unele substanțe inhibitoare. Se poate studia, de asemenea, comportarea rinichiului la încărcări ale organismului cu substanțe a căror excreție se cercetează (așa-numitele probe de încărcare).

Filtrarea glomerulară. Pentru aprecierea filtrării rinichiului se folosește metoda *clearance*-ului.

Așa după cum am arătat, prin *clearance* se înțelege volumul de plasmă, exprimat în mililitri, depurat de respectiva substanță într-un minut și se calculează după formula:

$$C = \frac{U \times V}{P}$$

în care, U = concentrația urinară a substanței în mg/ml; V = volumul urinar pe minut în mililitri; P = concentrația plasmatică a substanței în mg/ml.

Pentru determinarea filtratului glomerular, așa cum am mai arătat, se folosește inulina, care are un *clearance* de 126-128 ml/min.

Tot pentru determinarea debitului de filtrare se mai pot folosi: manitolul, creatinina sau bipsulfatul de Na.

Fluxul plasmatic renal. În condiții experimentale, irigația renală poate fi direct explorată prin măsurarea fluxului sanguin în vena renală. În condiții clinice, determinările se pot face prin aplicarea principiului Fick. Dintre substanțele folosite pentru determinarea fluxului plasmatic renal, cei mai utilizați sunt acidul paraaminohipuric (PAH), diodrastul și o serie de alte substanțe organice, între care și penicilina.

Testul se face perfuzând PAH sau oricare altă substanță aleasă în ritm continuu, în așa fel încât concentrația plasmatică a substanței să rămână joasă, dar constantă în tot timpul recoltărilor de sânge și cateterizărilor vezicale. Atât recoltarea sângelui, cât și a urinei se face la perioade de timp bine stabilite.

Clearance-ul PAH, deci fluxul plasmatic renal, este de 680-690 ml/min. Se poate, deci, observa că, din acest flux plasmatic, filtratul glomerular reprezintă doar 20% (126-128 ml/min).

Explorarea reabsorbției selective. Deși, principial, testele de explorare a reabsorbției diferitelor substanțe sunt aceleași, factorii de reglare sunt diferiți, iar prezentarea lor trebuie să fie făcută separat pentru reabsorbția obligatorie și facultativă.

Explorarea reabsorbției de glucoză oferă date suficiente pentru reabsorbția obligatorie.

Se știe că din punct de vedere al reabsorbției glucozei nu toți nefronii uoi rinichi se comportă egal. Unit oefroni (slabi) își saturează rapid capacitatea de transport al glucozei. Alți nefroni (puternici) își saturează mai greu posibilitățile de transport al substanței respective. Se înțelege de aici că în condițiile unei creșteri progresive a concentrației de glucoză în plasmă și, deci, în filtratul glomerular, primele urme de glucoză apar în urină după saturarea capacității de transport al glucozei în nefronii slabi și, deci, înainte de a se atinge Tm al glucozei (TmG) și care corespunde momentului în care capacitatea de transport al glucozei a tuturor nefronilor este saturată.

În mod normal, *clearance*-ul glucozei este de 270-350 mg/mio. Explorarea TmG constituie unica modalitate de diagnostic al diabetului renal glucozuric, în care celelalte mecanisme funcționale renale sunt normale.

Explorarea reabsorbției facultative folosește *clearance*-ul fosfaților, al sodiului, al acizilor aminați etc.

În cazul fosfaților, se știe că aceștia, filtrați la nivelul glomerulilor, se reabsorb printr-un mecanism de transport activ la nivelul tubilor proximali în cantitatea de 90-95%, procesul fiind controlat de hormonul paratiroidian. Pentru acest motiv, nici fosfaturia, nici fosfatemia nu pot da date asupra funcției rinichiului, întrucât ou permit separarea compoentei renale de efectele parathormonului.

Normal, *clearance*-ul fosfaților este de 2-5 mg/min.

Aprecierea eficienței factorilor de reglare a mecanismului de transport al fosfaților se poate realiza cu ajutorul testului Ellsworth-Howard, al testelor cu probenecid și al testului de perfuzie calcică.

Testul Ellsworth-Howard constă în determinarea fosfaturiei în cinci probe separate de urină, toate recoltate la intervale de o oră, după injectarea intravenoasă a 200 U parathormon. La subiectul normal se constată creșteri marcate ale fosfaturiei. La hipoparatiroidieni se constată creșteri importante ale fosfaturiei (reabsorbția redusă la zero), iar în pseudoparatiroidism nu se produc modificări ale fosfaturiei.

Determinarea clearance-ului ureei. Ureea filtrată la nivelul glomerulilor se reabsoarbe, așa după cum s-a arătat anterior, prin procese de difuziune pasivă în procent de 40 la nivelul tubilor. Comportarea rinichiului în procesul de eliminare a ureei poate fi apreciată prin determinarea:

1. *clearance*-ului ureei (coeficientul de depurare ureică Van Slyke);
2. constantei Ambard și a raportului între concentrația ureei în urină și plasmă;
3. probelor de încărcare cu uree sau cu proteine.

Pentru ușurința tehnică cu care se determină, *clearance*-ul ureei reprezintă una din cele mai utilizate probe funcționale renale în clinică.

În stare normală, coeficientul de depurare ureică (*clearance*-ul ureei) variază între 70 și 100%. Se admit variații între 60-132%. Scăderea sub 50% indică prezența unor leziuni ale parenchimului renal, caracterizate printr-un deficit de reabsorbție, iar creșteri până la 200% denotă o hiperfuncție renală.

Constanta Ambard constituie o probă care are mai ales importanță istorică, având o valoare de 0,07. Raportul între concentrația ureei în urină și sânge constituie un mijloc foarte simplu de apreciat capacitatea rinichiului de eliminare a ureei. Acest raport trebuie să fie egal sau mai mare de 20.

Valori sub 20, dar de regulă sub 10, se întâlnesc în insuficiența renală acută cu evoluție spre moarte sau cu revenire foarte lentă.

Valori peste 20 până la 110 se întâlnesc în hiperazotemiile trecătoare de origine funcțională.

Proba de încărcare cu uree. Această probă este utilă în special în cazurile în care *clearance*-ul ureei arată valori normale. Trebuie de subliniat faptul că această probă nu se poate efectua decât în cazul unor valori normale ale ureei serice. Se administrează dimineața pe nemâncate 20 g uree. În mod normal, vârful concentrației maxime a ureei se instalează după 2 ore de la administrarea substanței, iar revenirea la valorile inițiale se face la 4-5 ore. În cazuri patologice însoțite de insuficiență renală latentă, revenirea ureei la concentrațiile dinaintea administrării se face lent, cu atât mai lent, cu cât leziunile renale sunt mai severe.

Explorarea funcției de secreție tubulară. Substanțele secretate la nivelul tubilor renali prin mecanisme de transport activ sunt toate delimitate de T_m . Din cauza acestui mecanism secretor activ, unele din aceste substanțe sunt îndepărtate în totalitate din sânge într-o singură tură circulatorie în rinichi și, de aceea, așa cum s-a arătat, *clearance*-ul lor este utilizat pentru măsurarea fluxului plasmatic renal eficace. Această depurare totală nu este însă posibilă decât atunci când concentrația plasmatică a substanței respective este foarte mică. La concentrații ridicate, cantitatea prezentată tubilor spre secreție activă depășește capacitatea maximă de transport a tubilor (T_m), iar peste acest nivel de concentrație creșterea eliminărilor urinare nu se mai face decât prin creșterea concentrației lor în filtratul glomerular.

Valorile normale ale T_{mPAH} sunt 72-77 mg/min și constituie cea mai bună măsură a masei de țesut tubular funcțional (fig. 11.40).

Procedee similare se folosesc și în cazul altor substanțe transportate activ, cum ar fi diodrastul ($T_m = 42-52$ mg/min), penicilina etc.

O bună apreciere a secreției active și, deci, a masei funcționale tubulare se poate face prin cercetarea eliminării unor substanțe colorate, care sunt secretate de tubi. S-au folosit în acest sens albastrul de metilen și indigo-carminul, rodanatul de sodiu, roșul de Congo etc. Astăzi se folosește aproape în exclusivitate *proba cu fenolsulfonftaleină (PSP)*, sugerată de Rowntree.

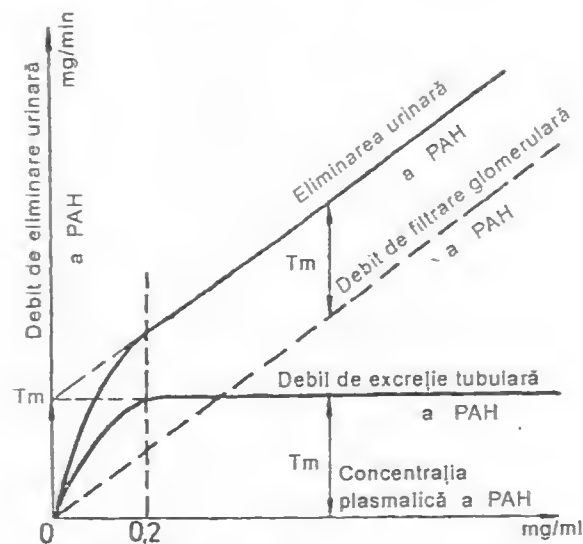


Fig. 11.40. Dinamica eliminării acidului paraaminohipuric (PAH) la nivelul rinichiului.

Dependența eliminărilor de PSP prin diureză obligă la asigurarea acesteia în timpul efectuării probelor de ingestie de apă. Se injectează PSP 6 mg în soluție 1% i.v., apoi se dă subiectului să ingere un pahar cu apă și se recoltează urina la 15 și 60 de minute. În primele 15 minute trebuie să se elimine cel puțin 30% din PSP injectat și 50-70% după 60 de minute. Când eliminarea PSP este sub 50% suntem în prezența unei tulburări a funcției de excreție renală. În insuficiența renală, eliminarea PSP scade între 50-25%, iar în uremie chiar sub 25%.

Explorarea mecanismelor de concentrare și diluție. Explorarea mecanismelor de economisire a apei sau electrolitelor în ansamblul lor constă în măsurarea variațiilor osmolarității urinei în condiții de încărcare sau de restricție apoasă.

Probele care explorează capacitatea de diluție și concentrare a rinichiului sunt foarte numeroase astăzi.

Proba de diluție și concentrare imaginată de Volhard este dintre cele mai folosite. Ea constă în urmărirea din jumătate în jumătate de oră a volumului și densității urinare după ingestia a 1 500 ml apă (proba diluției) și apoi a acelorași constante în cursul următoarelor 18 ore de completă restricție lichidiană (proba concentrării).

În stare normală, în timp de 4 ore se elimină cel puțin 1 500 ml de urină sau, de cele mai dese ori, peste 1 500 ml, prin antrenarea apei din depozitele organismului. În primele 2 ore se elimină mai mult de jumătate din cantitatea administrată.

Densitatea celor opt probe scade treptat de la 1 020-1 022, cât este în mod normal, la 1 001-1 003, în cel puțin una din probe. În condiții patologice, proba diluției poate arăta că rinichiul bolnav nu elimină mai mult de jumătate din lichidul ingerat în primele 4 ore (opsiurie), iar densitatea urinei nu scade sub 1 010 (izostenurie).

În partea a doua, după ce subiectul primește un regim uscat și hiperproteic (proba de concentrare), subiectul elimină în mod normal doar 300-700 ml de urină, în timp ce densitatea depășește în cel puțin una din probe valoarea de 1 028. Proba de concentrare poate arăta că un rinichi cu disfuncție elimină în cursul acesteia o cantitate de urină de două ori mai mare decât lichidul ingerat, iar densitatea urinei nu depășește 1 020.

Alte probe de explorare renală. Examenul radiologic al rinichiului și aparatului urinar constituie unul din mijloacele importante de diagnostic în bolile de rinichi. Metodele de explorare radiologică se adresează rinichiului și căilor urinare prin radiografia renală simplă și urografia descendentă, în care se utilizează o substanță de contrast injectată intravenos.

De asemenea, se pot obține date asupra vaselor renale prin intermediul: aortografiei, arteriografiei renale selective și flebografiei.

Puncția-biopsie renală prelevează un fragment de rinichi care poate fi ulterior studiat la microscop.

Explorarea funcțională a rinichiului cu ajutorul radioizotopilor: nefrograma izotopică, scintigrafia renală și testul fixării renale a mercurului radioactiv.

Nefrograma radioizotopică constă în înregistrarea continuă timp de 15-20 de minute a radioactivității regiunilor lombare după administrarea rapidă intravenoasă a unei cantități de 10-30 μ Ci hipuram 131 I diluat în 0,5-1 cm³ de ser fiziologic.

11.9. FIZIOLOGIA CĂILOR URINARE

După ce a parcurs tubii și canalele colectoare, urina trece prin vârful piramidei Malpighi în calicele bazinetului. De aici, prin bazinet și uretere se scurge în vezică. Vezica urinară este un rezervor extensibil care permite să se acumuleze cantități relativ importante de urină. Periodic, acest rezervor vezical se golește. Deși se formează în mod continuu la nivelul rinichilor, urina este eliminată la exterior, din vezică prin uretră, în mod discontinuu, prin actul micțiunii.

Formate din unirea calicelor, fiecare din cele două bazinete reprezintă o dilatație în formă de pânză a părții superioare a ureterelor.

Bazinetul și ureterele au o structură identică căreia i se disting trei tunici, din care cea mai importantă este stratul mijlociu, constituit din două pături de musculatură netedă: longitudinală internă și circulară externă.

Ureterele se prezintă ca niște tuburi musculoase, cu posibilități de a se contracta și relaxa. Această motricitate este autonomă datorită existenței plexurilor intramurale care se află sub influența inervației simpatice și parasimpatice. Simpaticul are, în general, o acțiune relaxantă asupra musculaturii netede ureterale, pe când parasimpaticul este stimulator al mișcărilor ureterului.

Factorul principal de stimulare a mișcărilor este reprezentat de distensia moderată a peretelui. Aceasta apare ca urmare a creșterii presiunii intrauterale. Mișcărilor uterinelor au toate caracteristicile undelor peristaltice. Ele încep la nivelul bazinetului și se propagă de-a lungul uterului, pentru a se termina la abuzarea lor în vezică. Spațiate în general la intervale de 1-8 minute, aceste unde peristaltice pot fi mai frecvente, ajungând până la 5-6 pe minut, când fluxul urinar este crescut. Acest peristaltism are rol propulsor pentru urină. La om, datorită ortostatismului, gravitația apare ca un alt factor care ajută progresarea urinei spre vezică.

Frecvența undelor peristaltice se poate observa prin intermediul cistoscopiei, și anume prin apariția picăturilor de urină la cele două orificii ureterale sau prin intermediul examenului radiologic: radioscopie, radiografie sedată, radiocinematografie după administrarea de substanțe opace la raze X.

11.10. FIZIOLOGIA VEZICII URINARE. MICTIUNEA

Vezica urinară este un rezervor sferoid, musculo-cavitar, cu suprafața interioară acoperită de o mucoasă constituită dintr-un epiteliu pluri-stratificat. Pătura mijlocie este formată din fibre musculare netede repartizate în trei pături, mai mult sau mai puțin evidente.

Ansamblul mușchilor vezical formează detrusorul. În apropierea uretrei el formează colul vezical, care, din punct de vedere fiziologic, reprezintă cea mai importantă zonă, datorită faptului că la acest nivel se află aparatul sfincterian al cărui joc permite replierea rezervorului vezical și vidarea sa în timpul mictiunii.

Mușchiul neted al colului constituie sfîncul intern, cu rol funcțional deosebit, datorită faptului că fibrele sale se pot contracta independent de cele ale detrusorului. Această formațiune de musculatură netedă este dublată de sfîncul extern sau striat (mușchiul compresor al uretrei), care, făcînd parte din mușchii vieții de relație, se contractă voluntar.

Vezica urinară nu este însă un simplu rezervor elastic a cărui umplere determină o presiune cu atât mai mare cu cât distensia este mai pronunțată. În mod obișnuit, pe măsura acumulării de urină, vezica are posibilitatea de a-și adapta pereții la conținut. Este vorba de o adaptare a tonusului fibrelor musculaturii netede, adaptare careia rezervorului vezicii îi dărește plasticitatea sa. Vezica urinară se poate destinde de aproximativ 5-6 ori fără să se producă modificări ale presiunii intracavitare.

Deci, între gradul de umplere și presiunea intracavitară a vezicii nu există o relație de directă proporționalitate. Între 5–250 ml conținut intravezical, presiunea rămâne constantă în jurul a 10 cm³ apă. Când cantitatea de urină din vezică depășește 250 ml, se produce o distensie din ce în ce mai mare, determinând creșterea presiunii intravezicale. Această creștere presională se produce treptat, așa încât, în momentul în care ajunge la nivelul critic de 15–17 cm³ apă, se determină declanșarea actului micțiunii. Cu cât distensia este mai mare, cu atât impulsurile sosite de la vezică sunt mai intense și devin dureroase.

La valorile presionale intravezicale de 15-17 cm³ apă se declanșează acul neuro-reflex al micțiunii, vezica se contractă și sfincterul intern se relaxează — este cazul micțiunii la copil. Pe măsură ce se dezvoltă căile spinale și centrale (encefalice) ale sistemului nervos, aferențele de la vezică urcă spre centri coordonatori ai vieții voluntare, sesizând scoarței stadiul de plenitudine a vezicii. De la nivelul cortexului pornesc influxuri eferente de comandă a golirii vezicii sau de reținere a urinei în vezică. Cu alte cuvinte, apare cea de a doua componentă a mecanismului micțiunii, și anume componenta voluntară, transformând micțiunea într-un act mixt neuro-reflex și voluntar.

În cazul când se comandă eliminarea, impulsurile eferente vor activa musculatura pereților abdominali, pentru contractarea acestora, și, concomitent, vor acționa și la nivelul sfincterului extern, pentru relaxarea lui. Dacă ambianța nu permite, influxurile centrale vor realiza pe aceleași căi contracția sfincterului extern și reținerea urinei. Retenția voluntară de urină este posibilă până la presiuni de 70-80 cm³ apă. Peste aceste valori se produce eliminarea urinei din vezică prin prea plin, retenția voluntară fiind imposibilă.

11.10.1. MECANISMUL NEURO-REFLEX AL MICTIUNII

S-a prezentat mai înainte că micțiunea se produce printr-un mecanism neuro-reflex. Impulsurile inițiate în însuși peretele vezical, datorită distensiei sale, sunt conduse prin fibrele senzitive (parasimpatice) la nivelul centrilor nervoși lombo-sacrați, de unde, pe căile eferente, este transmisă comanda la formațiunea efectoră, detrusorul vezical și aparatul sfincterian. Călea eferentă este reprezentată de fibre simpatico-parasimpatice.

Fibrele simplice își au originea în corpii neuronilor situați în coarnele laterale ale măduvei lombare. De la acest nivel emană fibrele preganglionare, care ajung la nivelul ganglionilor simpatici paravertebrali L_1-L_4 . De aici pleacă fibrele postganglionare, realizând nervul presacrat, de unde vor lua naștere nervii hipogastriци, care se distribuie atât corpului vezical, cât și sfincterului intern determinând relaxarea peretelui vezical. Fibrele parasimplice își au originea în măduva sacrată S_1-S_4 , coborând pe calea nervilor pelvici spre vezică. Sistemul nervos parasimpatic determină contracția vezicii urinare și relaxarea sfincterului intern. Putem considera, deci, inervația simpatică ca un sistem al reținerii urinei și umplerii vezicale, în timp ce inervația parasimpatică este responsabilă de evacuarea rezervei vezical în timpul micțiunii.

Dar, în afara acestei inervații, căile urinare prezintă și o inervație somatică, mai ales pentru uretră posterioară. Sfîncrerul extern este inervat de fibrele nervului rușinos intern, care are rolul de a crește tonusul acestuia, așa încît face posibilă rezistența la presiunea intravezicală de pînă la 70 cm³ apă (fig. 11.41).

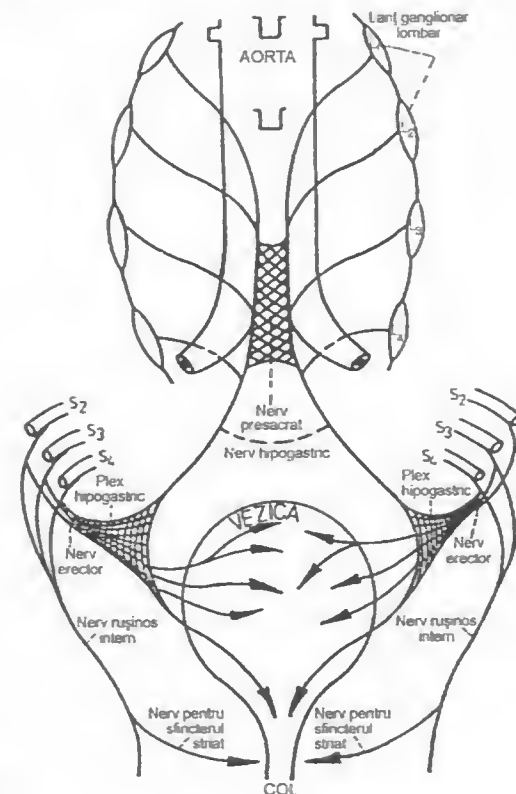


Fig. 11.41. Schema inervației vezicii urinare

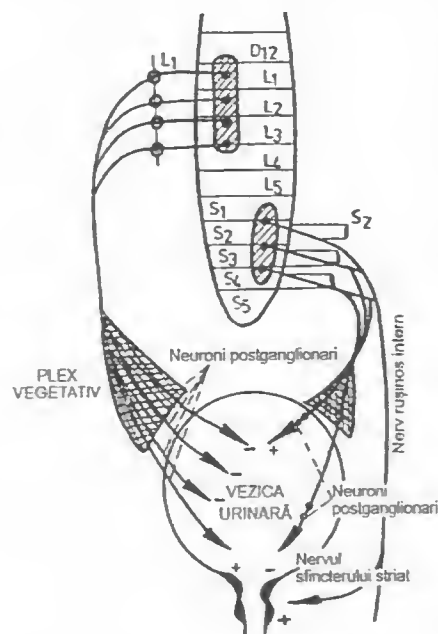


Fig. 11.42. Diferitele formațiuni nervoase implicate în actul micțiunii.

Polakiuria reprezintă creșterea frecvenței micțiunilor în 24 de ore. Prin disurie înțelegem apariția unor micțiuni frecvente și dureroase.

Retenția de urină reprezintă imposibilitatea eliminării de urină din vezică. Cele mai frecvente cauze sunt: prostatitele cronice hipertrofiate, cancerul de prostată. Anuria este rezultatul lipsei de formare a urinei. La copil pot apărea anumite tulburări în procesul de eliminare a urinei, cunoscute sub numele de enurezis, și se datoresc tulburării actului neuro-reflex sau de coordonare centrală a actului de micțiune, manifestat prin micțiuni nocturne involutare.

Deci, aparatul muscular vezico-sfincterian, controlat de inervația vegetativă, face din actul micțiunii un act reflex. Componenta neuro-reflexă predomină la copil, care, până la vârsta de un an și jumătate, nu-și poate controla micțiunea. După această perioadă se adaugă și componenta voluntară, care face din actul micțiunii un proces conștient.

S-a observat că secțiunile de măduvă, apărute în mod accidental după traumatisme, nu compromit actul micțiunii dacă sunt localizate deasupra măduvei lombo-sacrate. Aceasta demonstrează că sediul comenzilor nervoase ale acestui aparat vezico-sfincterian este asigurat prin centrii nervoși în măduva lombo-sacrată. Ansamblul acestor centri alcătuiește centrul vezico-spinal Budge (fig. 11.42).

Leziuni medulare joase, care distrug acest centru reflex, sunt urmate de tulburări grave ale micțiunii, eliminarea de urină producându-se prin prea plin, picătură cu picătură.

La om, după simpatectomie lombară, s-au observat micțiuni frecvente și în cantitate mică. Pe parcurs, aceste tulburări se compensează, așa încât în lunile următoare se ajunge la o golire vezicală la intervale de timp mai mari. În mod normal, numărul micțiunilor este de 3-4 în timpul zilei și 1-2 în timpul nopții.

În anumite circumstanțe pot să apară diferite tulburări în funcția de eliminare a urinei. Astfel, oliguria reprezintă scăderea cantității de urină eliminată în 24 de ore, în timp ce poliuria traduce creșterea cantității de urină eliminată în 24 de ore.

12. FIZIOLOGIA PIELII

Particularități morfo-funcționale. Pielea este cel mai mare organ al corpului uman, cu o greutate de 4-6 kg și o suprafață de 1,70-1,75 m², fiind compusă din trei straturi reprezentate de epiteliu (epidermul), matrice conjunctivă (dermul) și țesut grăos (hipodermul). Ea include și alte țesuturi, exceptând osul și cartilajul (fig. 12.1).

Epidermul este un epiteliu stratificat și cornificat, care are ca element structural keratinocitul, dar conține și celule dendritice (cu prelungiri), ca melanocitul, celula Langerhans, celula Merkel ș.a. Din profunzime spre suprafață, epidermul este format din următoarele straturi: bazal, malpighian (spinos), granulos, lucios și cornos. El este separat de derm prin membrana bazală dermo-epidermică.

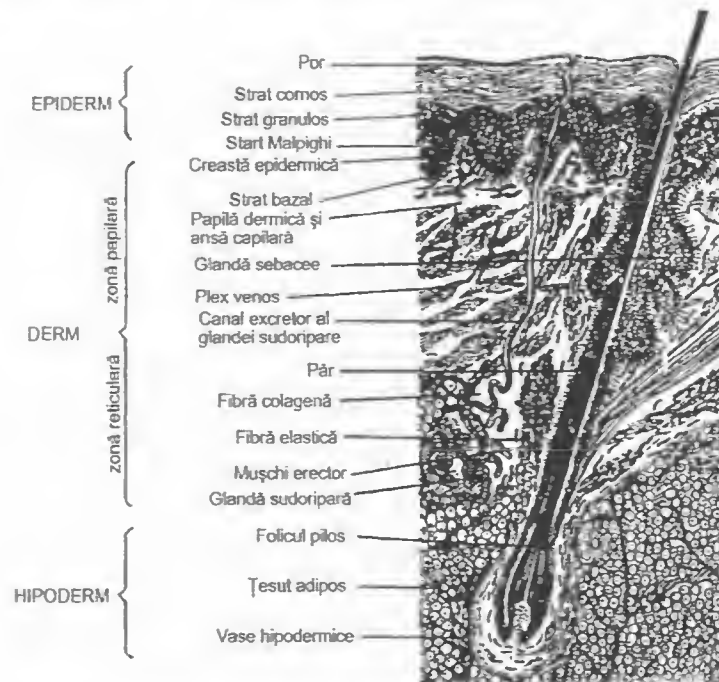


Fig. 12.1. Reprezentare schematică a structurii histologice a pielii (după Martinaud și Seroossi, 1977).

La rândul său, dermul este un țesut conjunctiv, fiind format din celule, fibre și substanță fundamentală, incluzând, de asemenea, vase, nervi, unități pilo-sebacee apocrine, glande ecrine, mușchi.

Hipodermul este format din lobuli grăsoși, separați prin travee de țesut conjunctiv, care conțin vase și nervi.

Ca organ complex, pielea prezintă funcții multiple, mai mult sau mai puțin specifice, începând cu funcțiile de protecție și depuratoare și sfârșind cu funcțiile: metabolică, secretorie, receptoare și termoreglatoare. În cele ce urmează vor fi trecute în revistă principalele funcții ale pielii, insistându-se asupra rolurilor sale fiziologice de barieră protectoare și de organ secretor și excretor.

12.1. FUNCȚIA DE PROTECȚIE

Protecția mecanică, chimică, termică, fizică, antimicrobiană etc. și impermeabilitatea pielii la apă se datoresc în primul rând epitelului cornos al epidermului bogat în keratină.

12.1.1. PROCESUL DE KERATINIZARE

Keratinizarea epidermului este o formă de diferențiere a keratinocitelor epidermice și anexiale. Acest proces cuprinde fenomene degenerative și de sinteză.

Fenomenele degenerative sunt reprezentate de alterări structurale ale nucleilor, organitelor celulare, membranelor plasmatică și desmozomilor, evidențiate prin microscopie electronică.

Citoplasma keratinocitelor bazale și din porțiunea joasă a stratului spinos conține numeroase organite celulare. Pe măsură ce celulele evoluează din profunzime spre suprafață, nucleii și organitele celulare dispar gradual, datorită intervenției unor enzime lizozomale. ADN nuclear este înlocuit de histone și alte proteine sintetizate de către celule în stratul granulos, iar membranele plasmatică sunt îngroșate de un depozit material dens, depus pe lamina internă, formându-se o „bandă marginală” paralelă cu suprafața cutanată. Insolubilitatea și stabilitatea membranelor celulare sunt datorate prezenței punților disulfidice și altor legături rezistente.

Keratinocitele sunt atașate între ele prin plăcuțe de legătură, numite desmozomi, care se rup și se reformează continuu, pe măsură ce celulele evoluează spre suprafață. În partea superioară a stratului granulos și în stratul cornos, desmozomii și „banda marginală” formează un strat continuu. În stratul cornos se produce clivajul desmozomilor, ceea ce duce la separarea celulelor cornoase.

Procese sintetice se asociază celor degenerative în cursul keratinizării, determinând sinteza tonofilamentelor, a keratinozomilor, a unor proteine distincte (keratohialina, filaggrina, keratina).

În celulele bazale sunt sintetizate activ tonofilamente care, pe măsura diferențierii keratinocitelor, se grupează în benzi. În stratul cornos, agregatele de tonofilamente bogate în grupări sulfhidril libere formează proteina fibroasă numită alfa-keratină, care este înglobată într-o matrice amorfă, bogată în sulf. Proteina matricei derivă din granulele de keratohialină, formate inițial în stratul spinos superior și devenind mai evidente în stratul granulos. Prezența legăturilor disulfidice în proteina amorfă a matricei determină inerția chinucă și rezistența stratului cornos.

Filaggrina, sintetizată sub forma unui precursor (profilaggrina), se asociază keratinei (două molecule de filaggrină la trei molecule de keratină), pentru a forma macrofibrile din familia filamentelor intermediare.

Keratinozomii (granule lamelare, cementozomi, corpi Odland) apar în celule în partea superioară a stratului spinos, în apropierea aparatului Golgi, și migrează în citoplasmă, fuzionând cu membrana plasmatică și descărcând conținutul lor în spațiul intercelular. Ei au 300 nm diametru, o structură lamelară ordonată și un conținut în fosfolipide, glicoproteine, fosfataze acide. Fosfolipidele contribuie la realizarea funcției de barieră a stratului cornos, iar fosfatazele acide favorizează descuamația prin dizolvarea structurilor intercelulare adezive. Astfel, keratinocitele pierd nucleii și organitele citoplasmatică și devin pline cu filamente bogate în grupări sulfhidril, care sunt înglobate într-o matrice amorfă, bogată în legături

disulfid, derivată din granulele de keratohialină. Complexul este înconjurat de o membrană îngroșată, insolubilă, datorită legăturilor disulfidice și altor punți chimice rezistente. Lipidele bipolare, descărcate în spațiul intercelular de către keratinozomi, contribuie la impermeabilizarea stratului cornos. Keratina rezultată aparține familiei de keratine cu structură polipeptidică și greutate moleculară variabilă între 40–68 000 daltoni.

Ele sunt insolubile în soluții apoase acide, alcali și solvenți organici, dar pot fi solubilizate în prezența unor substanțe denaturante concentrate.

Structura keratinelor este spiralată (helicoidală), centrul moleculei fiind alfa-helicoidal, iar periferia formată din fragmente variabile, nespiralate.

Sinteza keratinei este controlată genetic, existând câte 4–10 gene implicate în sinteza fiecărei subfamilii de keratine.

Fiecare din polipeptidele keratinei este codificată separat în genom și fiecare are un ARN mesager propriu. Polipeptidele mari, cu greutatea moleculară de 65–68 000 daltoni, sunt produse în straturile superioare ale epidermului, ca precursori direcți ai keratinei. Keratogeneza este accentuată de către estrogeni, corticosteroidi, extracte timice, presiune mecanică, radiații solare și inhibată de către hormonii tiroidieni și vitamina A.

12.1.2. MELANOGENEZA

Este un proces fiziologic la nivelul pielii de producere a pigmentului melanic (melanină).

Celulele implicate în această sinteză sunt *melanocitele*, celule dendritice situate între keratinocitele bazale, în matricea foliculului pilos din derm. Fiecare melanocit cedează pigmentul melanic la 36 de keratinocite din jur, constituind unitatea epidermică de melanină. Transferul pigmentului are loc prin fagocitarea capătului prelungirilor dendritice de către keratinocite (fig. 12.2).

Melanocitele conțin organite specializate în sinteza melaninei, *melanozomii*, care progresează din zona perinucleară spre dendrite, trecând prin patru stadii succesive. În stadiul I, melanozomii sunt sferici și conțin lamele concentrice orientate longitudinal, cu o periodicitate distinctă. În stadiul II sunt ovali, cu numeroase filamente longitudinale paralele, fără depunere de melanină. În stadiul III, structura lamelară este parțial mascată de depunerea de melanină, iar în stadiul IV, melanozomii sunt electronoapaci, melanină fiind depusă pe întreaga structură.

Melanozomii conțin proteine ale matricei structurale, tirozinază, o enzimă care catalizează biosinteza melaninei, și alte proteine de structură și funcție nedeterminate.

Diferențele de culoare între pielea albă și cea neagră se datoresc melanocitelor și melanozomilor. Deși nu există diferențe de densitate a melanocitelor între cele două tipuri de piele, pe o anumită zonă topografică melanocitele din pielea neagră sunt mai mari, mai dendritice, o proporție mai mare din ele conținând

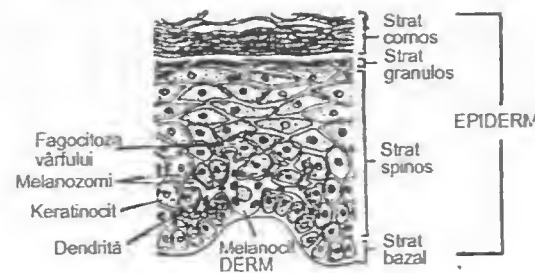


Fig. 12.2. Unitatea epidermică de melanină (după Bologna și Pawelek, 1988).

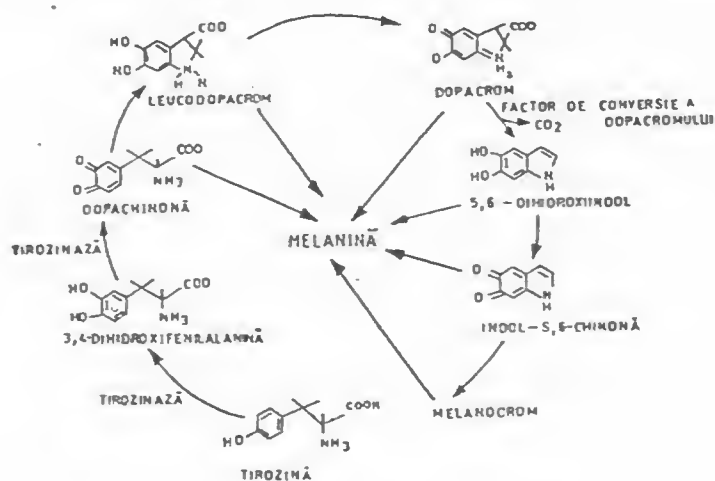


Fig. 12.3. Sinteza melaninei (după Bologna și Pawelek, 1988).

melanină. Melanozomii din pielea neagră sunt mai numeroși, mai mari, dispersați, cu un conținut mai bogat în melanină; ei sunt degradați mai lent prin enzimele lizozomale, odată transferați keratinocitelor. Melanozomii din pielea albă sunt mai mici și agregati în grupuri de 2-3; aceste agregate, fiind legate de membrana unui fago-lizozom, realizează degradarea mai rapidă.

Sinteza melaninei (calea clasică Mason-Raper) include următoarele etape: tirozinaza convertește tirozina la 3,4-dihidroxifenilalanină (DOPA) și oxidează DOPA la dopachinonă. Reacțiile ulterioare sunt menționate în fig. 12.3.

Tirozinaza are un rol important în sinteza melaninei, nivelul ei de activitate corelându-se cu gradul de producere a pigmentului. S-au descris mai multe tipuri de tirozinază, care diferă prin localizarea celulară și tipurile de glicozilare. Aceste ultime modificări translaționale se produc în cisternele aparatului Golgi, înainte de încorporarea enzimei de către melanozomi.

La om există două tipuri majore de melanină: *eumelanina* și *phaeomelanina*. Eumelanina este un heteropolimer brun-negru, conținut de către melanozomii ovali, care se formează pe calea menționată mai sus. Phaeomelanina este un compus galben-roșu, conținut de către melanozomii sferici, având o cale de sinteză diferită: dopachinona reacționează cu grupul tiol al cisteinei, formându-se 5-S-cisteinil-dopa, care se oxidează, dând *phaeomelanina*.

Printre factorii care influențează melanogeneza figurează hormonii stimulanți ai melanocitelor (melanotropine, alfa-MSH, gamma-MSH), care sunt peptide mici, cu 13-18 aminoacizi, produse la vertebrate de lobul intermediar al bipofizei, iar la om de către adenohipofiză. Ele sunt produse de clivaj ale unui peptid precursor comun: proopiomelanocortin, din care derivă pe lângă melanotropine și corticotropina, beta-lipotropina și beta-endorfină.

Acțiunea MSH de producere a creșterii pigmentației pielii a fost demonstrată pe modele animale și umane. MSH se leagă de receptori specifici de pe suprafața melanocitelor, acționând predominant în faza G₂ a ciclului celular. Formarea complexului hormon-receptor este urmată de stimularea adenilat ciclazei și de creșterea nivelului intracelular al adenozin monofosfatului ciclic (cAMP), care duce la o activitate crescută a tirozinazei și depunerea de melanină.

Radiațiile ultraviolete sunt un alt factor de stimulare a melanogenezei. Răspunsul sistemului pigmentar al pielii la acțiunea acestora este de două tipuri:

– pigmentarea imediată, care se produce în minute de la expunerea la soare și se șterge după 6-8 ore, fiind produsă de ultravioletele cu lungime mare de undă (UVA) și de lumina vizibilă. Aceasta este rezultatul unei oxidări a melaninei preexistente sau a precursorilor ei, mai mult decât al sintezei de pigment nou. După unele date, s-ar produce și o migrare periferică a melanosomilor în melanocite;

– pigmentarea întârziată, datorită atât UVA, cât și UVB (cu lungimea medie de undă), aparentă la 48-72 de ore și persistentă, este rezultatul unei noi producții de melanină.

După expunerea la ultraviolete, mărirea melanocitelor și nivelul activității tirozinazei cresc. După expuneri repetate cresc numărul melanocitelor care sintetizează activ melanina și numărul de melanosomi în stadiul IV, transferați keratinocitelor. Efectele ultravioletoare asupra producerii de melanină sunt legate de proprietățile fotoprotectoare ale melaninei. Pigmentul melanic protejează tegumentele contra radiațiilor ultraviolete.

Alți factori care stimulează melanogeneza sunt: esirogenii și progesteronul, ACTH, prostaglandinele E₂ și D₂, Cu, As ș.a.

Factorii care inhibă melanogeneza sunt: tiamina, acidul ascorbic, hidrochinona, Hg, Ag ș.a.

12.1.3. PRODUCEREA FANERELOR (PĂRUL ȘI UNGHIILE)

12.1.3.1. Părul

Părul nu are funcție de protecție la om, fiind doar ornament al corpului, cu rol psihologic important. Ritmul de creștere a părului variază cu specia și cu regiunea corpului. Măsurătorile cele mai sigure,

prin marcarea cisteinei și autoradiografie, au evidențiat o rată zilnică medie de creștere de 0.37 mm pentru părul scalpului uman. Raderea la intervale regulate selecționat sau fixarea de tuburi capilare gradate în jurul unor peri în creștere au dus la estimări asemănătoare.

La femeie, părul scalpului crește mai repede și părul de pe corp mai încet decât la bărbat. Rata de creștere a părului de pe corp la om este mărită de hormonii androgeni și, probabil, este diminuată de hormonii estrogeni. Diferiți alți factori endocrini influențează rata creșterii părului la animale și om.

Ciclul evolutiv al părului cuprinde trei faze: de creștere (anagen), de involuție (catagen) și de moarte (telogen).

Stadiul anagen se caracterizează prin formarea unei noi matrice regeneratoare a părului, a unui nou bulb și, apoi, a unei noi tije care avansează în sus până la suprafața pielii, dislocând vechiul fir de păr mort. În catagen, celulele matricei încetează proliferarea, producându-se involuția până la dispariția acesteia. În telogen, părul mort „în măciucă” ascensionează până la nivelul zonei de inserție a mușchiului erector apoi se elimină (fig. 12.4).

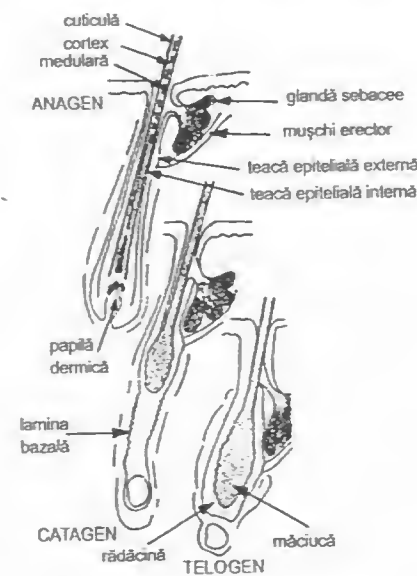


Fig. 12.4. Ciclul evolutiv al foliculului pilos uman (după Fitzpatrick și colab., 1987).

Steroizii androgeni, enzimele care îi convertesc și proteinele care îi leagă au rol în creșterea părului sexual și în producerea calviției (alopecia de tip masculin). Corticosteroizii, ACTH, hormonul somatotrop produc creșterea pilozității. Estrogenii stimulează indirect pilogeneza axilară și pubiană. Hormonii tiroidieni sunt indispensabili pentru creșterea normală a părului.

Razele ultraviolete și infraroșii fac parte și ele dintre factorii care stimulează pilogeneza.

12.1.3.2. Unghiile

Unghiile îndeplinesc următoarele funcții:

- datorită durității și flexibilității lor, au rol de protecție a extremității degetelor de la mâini și de la picioare;
- reprezintă un element anatomic indispensabil pentru finețea sensibilității tactile pulpare, din cauza planului fix de contrapresiune pe care îl realizează;
- rol de prehensiune prin marginea liberă;
- rol de unealtă personală, folosită pentru a scărpi, a curăța o suprafață, a cânta la un instrument și, într-o oarecare măsură, de armă de apărare sau atac, când servește la zgâriat, la strangulare etc;
- rol estetic, important în special pentru persoanele de sex feminin.

Rata de creștere a unghiei este în medie de 0,5–1,2 mm/săptămână pentru unghiile de la mâini. Unghiile de la picioare cresc de două ori mai încet.

Rata de creștere este mai mare vara, în climat cald, în a doua decadă a vieții, în timpul sarcinii, după traumatisme, după avulsie. Înfometarea, unele boli infecțioase virale duc la reducerea creșterii unghiei sau la subțierea și canelarea lamei.

12.2. FUNCȚIILE DE SECREȚIE ȘI EXCREȚIE ALE PIELII

Funcția de secreție este asigurată de glandele sebacee și sudoripare.

12.2.1. SECREȚIA SEBACEE

Sebumul este produsul de secreție a acestor glande acinoase, atașate foliculului pilos și dispuse de predilecție pe anumite zone cutanate (frontal, la marginea zonei piloase a scalpului, sprâncenar și intersprâncenar, nazo-genian, mentonier, presternal, interscapular). Mecanismul de secreție este de tip holocrin, întreaga celulă sebacee și conținutul ei fiind eliminate în ductul secretor. Sebumul reprezintă produsul final al diferențierii terminale a unei populații de celule germinative. Sebogeneza este un proces continuu, analog cornificării epidermului.

Sebumul conține un amestec de lipide, componentele majore fiind reprezentate de trigliceride, esterii ai ceridelor, squalen, esterii de colesterol, colesterol. Prin scindarea trigliceridelor, de către lipazele secretate de flora bacteriană a infundibulului folicular, rezultă acizi grași liberi.

Funcțiile sebumului. La animal, sebumul protejează părul de umiditate și îl izolează de căldură. De asemenea, secreția sebacee poate fi odoriferă, servind ca factor de atracție sexuală.

La om, funcțiile îndeplinite la animal fiind nerelevante, sebumul îndeplinește alte roluri: de barieră de protecție, în absorbția percutanată, activitate antifungică, precursor al vitaminei D ș.a.

Controlul secreției glandelor sebacee. Glandele sebacee, dezvoltate din luna a 4-a a vieții intrauterine, involuează după naștere, rămânând mici și inative în decursul copilăriei. Maturarea sebacee începe la 7–8 ani și continuă în adolescență, secreția de sebum fiind maximă în anii târzii ai adolescenței. Ulterior, nivelul secreției sebacee scade, rămânând relativ constant până la vârste înaintate. O descrescere marcată este remarcată după 50 de ani la femeie și nu înainte de 70 de ani la bărbat.

Reglarea secreției de sebum este sub control predominant hormonal. Androgenii sunt principalii hormoni cu efect stimulant la pubertate. Administrarea acestor compuși la persoanele cu glande sebacee inadecvat stimulate duce la creșterea producției de sebum.

Alături de androgenii gonadali, cei adrenali stimulează glanda sebacee la femeie, ca și la bărbat. Adrenocorticală cu un glucocorticoid exogen poate descresce producția de sebum la femeie, ca și la bărbat.

Acțiunea hipofizei asupra secreției de sebum este indirectă, datorită eliberării continue de hormoni tropi hipofizari. Nu există un hormon sebotropic specific, dar gonadotropinele, prin stimularea gonadelor, acționează în acest sens. În plus, este posibil ca TSH și ACTH să aibă efecte similare. Studiile pe animale au dovedit că MSH, hormonul de creștere și prolactina stimulează dezvoltarea glandelor sebacee. Estrogenii se opun efectului stimulant al androgenilor la doze mari, gonadotropin-inhibitoare. Progesteronul, în doze fiziologice, nu are acțiune asupra secreției de sebum la bărbat și nu se remarcă o variație semnificativă a nivelului acesteia la femeie în timpul ciclului menstrual.

Hormonii tiroidieni pot să influențeze secreția de sebum, în hipotiroidism nivelul acesteia fiind scăzut.

Factorii nervoși care influențează secreția glandelor sebacee sunt puțin cunoscuți. Se remarcă lipsa de răspuns atât la denervare, cât și la excitarea neuronală sau administrarea de mediatori ai neurotransmiterii, ca acetilcolina și norepinefrina.

Secreția de sebum este însă influențată de lipoliza microbiană și tensiunea intrafoliculară.

În ceea ce privește lipoliza microbiană, secreția sebacee bogată în acizi grași saturați și trigliceride determină dezvoltarea florei microbiene saprofite, care produce, prin scindarea lipidelor, acizi grași nesaturați, cu acțiune antimicrobiană.

Tensiunea intrafoliculară, determinată de cantitatea și calitatea secreției sebacee, este un alt factor de control al acesteia. Când stratul de sebum de la suprafața pielii depășește grosimea necesară, se produce o îngreunare a eliminării secreției, presiunea intrafoliculară crește și secreția scade. Când stratul de sebum de la suprafață s-a subțiat, presiunea intrafoliculară scade și secreția crește.

12.2.2. SECREȚIA SUDORALĂ

Secreția sudorală este produsul glandelor sudoripare, care sunt de două tipuri: ecrine și apocrine.

Glandele sudoripare ecrine sunt formate dintr-un glomerul secretor, situat profund dermo-hipodermic, un conduct sudorifer dermic și un conduct sudorifer epidermic, deschizându-se la suprafața pielii printr-un orificiu numit por. În condiții de repaus secretor, porul sudoripar este acoperit de un opercul de keratină. Glandele sudoripare ecrine sunt răspândite neuniform pe întreaga suprafață a tegumentelor, în număr total de 2–5 milioane. Au densitatea cea mai mare pe palme și tălpi, fiind mai numeroase la bărbat.

Glandele sudoripare apocrine au o morfologie asemănătoare celor ecrine, glomerul fiind însă mai voluminos. Ele se deschid fie la nivelul foliculului pilo-sebaceu, fie direct la suprafața pielii. Numărul lor este mult mai redus și sunt dispuse în regiunile axilare, perineo-genitale și la nivelul areolei mamare.

Din punct de vedere funcțional, glandele sudoripare ecrine sunt merocrine, celula secretorie rămânând intactă. Glandele sudoripare apocrine au o secreție holomeroocrină, o parte din citoplasma celulelor fiind eliminată odată cu produsul de secreție.

De menționat că nu toate glandele sudoripare ecrine funcționează în același timp, existând un raport de 16/14 între cele în fază secretorie și cele în fază de repaus. Perioada de activitate este întreruptă de câteva minute de repaus. Creșterea temperaturii ambiante și efortul fizic alungesc perioada de activitate a glandelor. În aceste condiții, crește cantitatea de sudoare eliminată, în timp ce concentrația acesteia scade.

a) Producerea secreției sudorale ecrine. Procesul secretor începe în celulele palide ale glomerulului sudoripar ecrin, înervate predominant de fibre nervoase simpatice colinergice, nemielinizate. Rare terminații nervoase adrenergice sunt remarcate în vecinătatea glandelor sudoripare ecrine. Sub acțiunea unor mediatori chimici variați, ca acetilcolina, calciul, prostaglandina E₁, epinefrina, are loc o creștere a transportului membranal de Na, Cl, K și alți electroliți, care difuzează în citoplasma celulei palide. O pompă de sodiu localizată pe membrana plasmatică, canaliculă, a aceleiași celule intervine apoi în transportul activ al Na în canaliculi, urmând transportul Cl și al apei. Rezultă astfel sudoarea „precursoră”, izotonică cu plasma.

Sub acțiunea aldosteronului, la nivelul epiteliului conductului sudoripar se produce reabsorbția Na, în schimb parțial cu K. Datorită relativei impermeabilități pentru apă, ce este astfel mai puțin reabsorbită, se formează o soluție hipotonă, care este sudoarea finală. Spre deosebire de celulele palide, celulele întunecate ale glomerulului secretor ecrin secretă mucină. Contrakția glomerulului prin celulele mio-epiteliale joacă un rol redus în eliminarea secreției sudorale la suprafața pielii. Creșterea sudorației este datorită în special măririi ratei și nivelului sudorii secretate de către celulele palide, ca răspuns la stimuli sudoriferi.

Caracterele și compoziția sudorii ecrine. Sudoarea ecrină este o soluție incoloră, hipotonă, mirositoare, cu densitatea specifică între 1 001 și 1 015 și pH-ul între 4,5 și 5,5. Ea conține 99% apă și 1% substanțe dizolvate. Compușii minerali sunt reprezentați de: Na, Cl, K, Ca, P, Mg, I, bicarbonat, sulfat, Fe, Zn ș.a.

Dintre compușii organici azotați, sudoarea ecrină conține proteine și substanțe rezultate din degradarea acestora: uree, acid uric, creatinină, amoniac, aminoacizi, iar din cei neazotați – acid lactic, urme de glucoză, vitamine (C, B₁, B₆) ș.a. În compoziția ei pot fi evidențiate, de asemenea, imunoglobuline, histamină, bradikinină, prostaglandine, enzime proteolitice (proteaze) ș.a.

Concentrația diferitelor substanțe din sudoarea ecrină variază în funcție de rata sudorației. O rată crescută produce o eliminare de concentrații mai mari de Na și Cl și concentrații mai mici de K, lactat și uree.

Tabelul (12.1) prezintă concentrația principalilor compuși ai sudorii ecrine.

TABELUL 12.1

Principalii constituenți chimici ai sudorii ecrine			
		g/dl	g/dl
Apa 99%			
	Substanțe organice	Uree	0,03
		Acid lactic	0,70
		Glucoză	0,04
Reziduu uscat, 1%	Săruri minerale	Cloruri	0,20
		Cloruri de Na ⁺	0,15
		Cloruri de K ⁺	0,017
		Sulfat	0,004

Controlul secreției sudorale ecrine. Factorii care intervin în controlul secreției sudorale ecrine sunt intrinseci și extrinseci.

Dintre factorii intrinseci, cei nervoși au rol important, intervenția lor fiind confirmată de studii efectuate cu ajutorul mediatorilor colinergici și adrenergici și al unor substanțe inhibitorie. Glandele sudoripare ecrine de pe palme, tălpi, frunte și din axile răspund predominant la stimuli emoționali.

Alți factori intrinseci implicați în reglarea sudației sunt factorii hormonal. Aldosteronul și hormonul anti-diuretic determină reabsorbția Na la nivelul epiteliului canalului sudorifer. Catecolaminele intervin în maximalizarea răspunsului din timpul exercițiului fizic. Hormonii tiroidieni favorizează reabsorbția electroliților.

Factorii extrinseci implicați în controlul secreției sudorale ecrine sunt stresul caloric, exercițiul fizic ș.a.

Rolul stresului caloric în stimularea secreției sudorale ecrine este bine cunoscut. Prin evaporarea apei excretate la suprafața pielii se împiedică încălzirea excesivă a corpului, 1 litru de sudoare îndepărtând 585 de kilocalorii. Creșterea temperaturii externe determină creșterea activității secretorii a numărului glandelor sudoripare ecrine. Astfel, o persoană supusă la temperaturi înalte poate elimina 2–3 litri de sudoare/oră. Exercițiul fizic determină o creștere și mai mare a sudorației maxime în mediul cald.

În condițiile unui stres caloric prelungit, cum este cel produs de climatul tropical, glandele sudoripare ecrine devin „aclimatizate”, câștigând abilitatea de a răspunde mai intens la creșteri relativ mici ale temperaturii corpului. Pe de altă parte, secreția de aldosteron este mai mare, crescând reabsorbția Na la nivelul canalului sudorifer și împiedicând pierderea excesivă a acestuia din organism.

Uncle metale grele și medicamente sunt excretate prin sudoarea ecrină.

b) **Producerea secreției sudorale apocrine.** Se realizează continuu, dar excreția este episodică, prin contracția celulelor mio-epiteliale ale glomerulului sudoripar apocrin. Secreția apocrină este redusă cantitativ, mai vâscoasă, alb-lăptoasă, mirositoare, fluorescentă, cu un pH alcalin. Compoziția chimică nu poate fi bine precizată datorită amestecului în timpul recoltării cu secreția sebacee și secreția sudorală ecrină.

Mirosul particular este datorat acțiunii florei bacteriene din ductul folicular și de la suprafața pielii, cu producerea de acizi grași, amoniac și alte substanțe odorifere.

Controlul secreției sudorale apocrine. Procesul secretor debutează odată cu pubertatea, sub acțiunea hormonilor sexuali.

Glandele sudoripare apocrine sunt inervate de fibre nervoase nemielinizate adrenergice și colinergice, dar sunt stimulate mai intens de către catecolamine, decât de acetilcolină.

Contrakția celulelor mio-epiteliale și eliminarea sudorii apocrine sunt induse de către stresul emoțional. Excitația termică nu influențează secreția sudorală apocrină.

Explorarea funcției glandelor sudoripare. Activitatea glandelor sudoripare prezintă o importanță deosebită pentru îndepărtarea din organism a unor substanțe de deșeu metabolic, considerându-se chiar că astfel s-ar putea supla activitatea excretorie a unui rinichi.

Pentru a putea evalua funcția glandelor sudoripare, s-au imaginat mai multe metode, din care sunt de reținut proba cu pilocarpină și proba Rosenthal.

Proba cu pilocarpină constă în injectarea subcutanată a 0,2 ml pilocarpină 0,5%. După 5–10 minute apare în mod normal o secreție sudorală accentuată. Ea poate fi pusă în evidență dacă în prealabil s-a badijonat pielea cu iod și amidon. Lipsa sau întârzierea secreției indică tulburări de origine nervoasă.

Proba Rosenthal utilizează un amestec de Sudan III 0,25% în cloroform și albastru de metilen 0,25% în alcool, care dă o culoare albastră. Cu acesta se badijonează diferite regiuni ale pielii, iar după câteva minute apare o culoare cărămizie, dacă sudoarea conține lipide, sau violetă, dacă sudoarea are compoziția hidrică obișnuită. S-a văzut că persoanele în vârstă elimină o sudoare bogată în lipide, iar tinerii au o sudoare predominant hidrică.

12.3. FUNCȚIA SENZORIALĂ A PIELII

Aceasta constă în preluarea informațiilor tactile, termice și dureroase de către zona receptoare cutanată. Ea va fi prezentată la subcapitolul consacrat funcțiilor senzitivo-senzoriale ale sistemului nervos.

12.4. FUNCȚIA DE APĂRARE A PIELII

Pielea îndeplinește un rol important nu numai în protecția organismului față de diverși factori din mediul extern: mecanici, fizici, chimici, biotici, ci și la realizarea funcției complexe de apărare. La aceasta contribuie următoarele elemente:

- integritatea structurală a tegumentelor;
- prezența stratului cornos, realizând protecția față de factori mecanici și fizici (radiațiile ultraviolete) și descuamarea continuă a porțiunii superficiale a acestuia, producând îndepărtarea mecanică a substanțelor chimice, microbilor, fungilor, virusurilor etc;
- realizarea „filmului hidrolipidic superficial” și a „mantelei acide” a pielii.

Filmul hidrolipidic superficial este pelicula lichidiană care acoperă suprafața pielii, formată prin emulsionarea componentelor lipidice și apoase. Substanțele lipidice reprezintă 20–30% din această peliculă, fiind un amestec de acizi grași liberi, steroli, mono-, di- și trigliceride, esterii sterolici, fosfolipide, ceruri ș.a. Din aceste lipide de suprafață, 95% sunt produse prin secreția sebacee și 5% sunt de proveniență epidermică.

Secreția sudorală furnizează cea mai mare parte din apa de suprafață, electroliți, acizi (uric, lactic, formic, citric) ș.a.

Filmul hidrolipidic superficial are următoarele roluri:

- lubrifică suprafața pielii, făcând-o flexibilă și rezistentă la acțiunea factorilor fizici și chimici;
- controlează evaporarea apei, menținând constantă componenta hidrică a stratului cornos;
- acțiune antimicrobiană și antifungică.

„Mantaua acidă” a pielii este reprezentată de mediul acid de la suprafață, pH-ul fiind între 4 și 7, cu excepția pliurilor unde aciditatea este mai scăzută. Stratul lucios este foarte acid, constituind rezerva acidă a pielii.

Factorii care realizează menținerea constantă a acidității cutanate sunt:

- secreția sudorală și secreția sebacee (prin conținutul în acizi grași);
- disocierea substanțelor hidrosolubile de la suprafața pielii;
- acidul carbonic provenit din metabolismul straturilor profunde, care este eliminat la suprafață.

„Mantaua acidă” îndeplinește următoarele funcții:

- acțiune antimicrobiană;
- acțiune de neutralizare a bazelor și acizilor prin sisteme tampon foarte labile și acid carbonic – bicarbonați, acid lactic – lactați, acizi aminați liberi, cu rol de tampon prin lanțurile laterale care se comportă fie ca acizi, fie ca baze ș.a.

Un alt element care contribuie la realizarea funcției de apărare a pielii este structura dermului (celule, fibre și matrice intercelulară), care o face să fie mecanorezistentă.

Hipodermul, constituit din țesut adipos, are rol izolat termic și mecanic. El reprezintă, de asemenea, o rezervă energetică plasată în situație optimă pentru organism.

12.5. ROLUL PIELII ÎN MENȚINEREA HOMEOSTAZEI ORGANISMULUI

12.5.1. ROLUL PIELII ÎN HOMEOSTAZIA HIDRICĂ

Menținerea constantă a volumului apei din organism este realizată prin două sisteme de autoreglare: unul hipotalamo-hipofizar, care acționează prin hormonul antidiuretic, și altul suprarenal, care intervine prin aldosteron.

Pielea are un rol secundar în homeostazia hidrică, participând alături de rinichi la eliminarea apei din organism. Prin secreția sudorală se elimină aproximativ 1 000 ml apă în 24 de ore, iar prin perspirație insensibilă încă 300 ml.

12.5.2. ROLUL PIELII ÎN REGLAREA HEMODINAMICĂ

Pielea are un rol important în mecanismele de reglare hemodinamică, prin bogăția sa în plexuri vasculare și posibilitatea de a face să stagneze cantități variabile de sânge la acest nivel. Acestea pot atinge până la 30% din masa sanguină circulantă în condițiile vasodilatației periferice generalizate.

În dermatozele generalizate cu vasodilatație, la nivelul circulației cutanate pot apărea perturbări hemodinamice, mergând până la insuficiență cardiacă.

12.5.3. ROLUL PIELII ÎN HOMEOSTAZIA HORMONALĂ

Pielea are un rol important în metabolizarea unor hormoni, ca testosteronul, estrogenii, progesteronul, cortizolul, enzima implicată fiind 5 alfa-reductaza. În unele cazuri rezultă hormoni mai activi.

12.6. FUNCȚIA IMUNOLOGICĂ A PIELII

Pielea a fost considerată mult timp doar o barieră de tip mecanic față de mediul înconjurător, dar actualmente este demonstrat rolul său dinamic în apărare prin punerea în joc a sistemului imunitar. SIS (*Skin Immune System*) intervine mai ales în reacțiile de hipersensibilitate.

Componentele SIS sunt: limfocitele T, celulele dendritice prezentatoare de antigen, mastocitele, macrofagele tisulare, granulocitele neutrofile, keratinocitele.

Linfocitele T circulante, celule al căror număr este încă rău definit, se infiltrează în pielea sănătoasă, devenind rezidente pentru o perioadă nedeterminată. Ele sunt localizate de preferință în jurul și deasupra plexurilor venoase superficiale, fiind rare în epiderm. Fenotipul imunohistochimic al limfocitelor T din pielea normală arată CD₄ și CD₈ în raport de 0,97.

Celulele dendritice prezentatoare de antigen constituie o categorie de celule HLA-DR pozitive, ca și monocitele/macrofagele, de care se deosebesc printr-o capacitate limitată de fagocitare. Din acestea fac parte: celula Langerhans, celula dendritică nedeterminată, celula cu vâl, celula interdigtală, celula reticulară dendritică, celula Granstein. În epidermul șoarecelui a fost descris un nou tip de celulă dendritică, celula Thy-1 pozitivă, cu funcție de *Natural Killer*, dar nu a fost găsit un echivalent al acesteia la om.

Celula Langerhans (CL) este probabil cea mai importantă celulă implicată în răspunsul imun cutanat. Ea poate fi pusă în evidență fie cu clorură de aur, prin metode imunohistochimice, fie prin microscopie electronică, cu ajutorul anticorpilor monoclonali și policlonali.

CL este o celulă imunocompetentă a epidermului implicată în inducerea activării autologe și alogeneice a celulelor T, generarea activității citotoxice a celulelor T, hipersensibilitatea de contact, rejetul grefelor cutanate ș.a.

Capacitatea CL de a juca rolul de celulă prezentatoare de antigen limfocitelor T este bine stabilită. De asemenea, CL produce interleukină-1 (IL-1) și prostaglandină D₂. Aceasta din urmă servește ca mediator între activitățile reglatorii ale sistemului imun și activitățile sale inflamatorii și antiproliferative. Iradierea cu raze ultraviolete determină o diminuare a numărului CL din epiderm. Recent a fost demonstrată infectarea CL cu HIV (*Human Immunodeficiency Virus*).

Celula dendritică nedeterminată este o celulă dendritică epidermică lipsită de granule Birbeck, melanozomi și granule Merkel. Este HLA-DR pozitivă și prezintă receptori pentru fragmentul Fc al IgC și pentru C3. Celule asemănătoare au fost identificate recent în dermul papilar normal, perivascular, exprimând CD₁₁ și CD₁. S-au constatat, de asemenea, forme de tranziție între celulele dendritice nedeterminate dermice și CL epidermice. Aceste date sugerează că celulele dendritice nedeterminate sunt precursori ai CL.

Celula cu vâl poate fi găsită în limfa aferentă care drenează pielea, fiind varianta intralimfatică a celulelor dendritice ale SIS. Ea derivă din CL și/sau celula dendritică nedeterminată.

Mastocitele sunt celule cu granulații metacromatice intracitoplasmatic, care conțin amine vasoactive. Sunt descrise două tipuri: tipul I, mucos, de talie mai mică, și tipul II, conjunctiv. Ambele tipuri pot fi găsite atât la nivelul mucoaselor, cât și în țesutul conjunctiv dermic. Mastocitele au rol în reacțiile de hipersensibilitate de tip imediat, posedând pe membrana lor receptori pentru fragmentul Fc și IgE. Fixarea antigenelor specifice de către IgE duce la degranularea mastocitelor, cu eliberarea mediatorilor chimici vasoactivi, determinând creșterea permeabilității peretelui vascular.

Dermul papilar și reticular al pielii normale conține monocite/macrofage încă necuantificate. Rolul acestor celule este de fagocitare a resturilor și substanțelor în continuă formare din celulele degradate.

Granulocitele neutrofile ajung la nivelul pielii după un sejur mediu intravascular de 10 ore. Soarta acestor celule care intră în țesuturi nu este în întregime clarificată.

Keratinocitele, constituenții celulari de bază al epidermului, participă activ ca celule imunocompetente. Ele sunt capabile să secrete mediatori care modulează reacțiile imunitare și inflamatorii.

Citokinele produse de celulele epidermice sunt de tipul interleukinelor (IL-1, IL-3, IL-6, IL-8), interferonilor, factorilor de creștere, citotoxinelor și factorilor supresori.

Tabelul 12.11 prezintă activitatea principalelor citokine epidermice.

TABELUL 12.11

Activitatea principalelor citokine epidermice
(după Demarchez și colab.)

	IL-1	IL-3	IL-6	IL-8	GSM-CSF	IFN-gamma	TNF-alfa
Activitate							
- antivirală	da	?	nu	?	?	da	da
- antitumorală	da	?	?	?	?	da	da
Mitogen							
- pentru diverse celule	da	da	da	?	da	da	da
Citostatic							
- pentru diverse celule	da	?	da	?	?	da	da
- pentru celulele tumorale	da	?	?	?	?	da	da
Activează							
- macrofagele	?	?	?	?	da	da	da
- celulele B	?	?	?	?	?	inhibă	?
- celulele T	da	?	da	?	?	da ?	?
- celulele endoteliale	da	?	?	?	?	da	da
Stimulează							
- activitatea granulocitelor	da	?	?	da	da	?	da
- activitatea eozinofilelor	nu	da	?	?	da	?	da
- activitatea celulelor NK	?	nu	?	?	?	da/nu	nu
- activitatea celulelor LAK	?	inhibă	?	?	?	da	?
- diferențierea celulelor B	da	da	da	?	?	da	da/nu
- proliferarea celulelor B	da	?	?	?	?	da	da/nu
- proliferarea celulelor T	da	?	da	?	da	nu	da
- diferențierea celulelor T	?	?	da	?	?	?	?
- angiogeneza <i>in vivo</i>	?	?	?	?	?	?	da
- hematopoieza <i>in vivo</i>	da	da	?	?	da	?	?
Crește expresia							
- MHC de clasă I	nu	?	?	?	?	da	da
- MHC de clasă II	?	?	?	?	?	da	nu
Induce							
- ICAM-1	da	?	?	?	?	da	da
- febra	da	?	?	?	?	da	da
- proteinele fazei acute	da	?	da	?	?	da	da

12.7. FUNCȚIA DE PENETRABILITATE A PIELII

Pielea este atât un înveliș impermeabil, protector, care limitează pierderea de apă din organism, cât și o membrană fragilă, semipermeabilă, permițând intrarea selectivă a unor substanțe chimice.

Pentru măsurarea absorbției percutanate s-au imaginat variate tehnici *in vivo* și *in vitro*.

Metoda cea mai folosită *in vivo* este determinarea prin tehnici chimice sau radioizotopice a ratei de dispariție a substanțelor care sunt aplicate local (topic). Mai puțin sensibile sunt măsurătorile excreției urinare, intestinale sau respiratorii, ca și metodele care apreciază depunerile unor substanțe în organele interne sau efectele farmacologice, imunobiologice sau biochimice ale acestora aplicate local. Analiza autoradiografică permite localizarea microscopică a compușilor aplicați.

In vitro, absorbția percutanată poate fi apreciată cantitativ prin metoda măsurării pasajului unei substanțe chimice prin pielea umană sau de șobolan, montată într-o cameră de difuziune.

Căile absorbției percutanate sunt reprezentate de stratul cornos, foliiculul pilo-sebaceu și ductul sudoripar.

Studiile recente indică faptul că principala cale de absorbție percutanată a substanțelor chimice este difuziunea pasivă prin stratul cornos.

Sunt presupuse mai multe etape în absorbția percutanată: difuziunea prin stratul cornos, desfacerea moleculelor în epidermul viabil, difuziunea prin dermul papilar și transferul în circulația sanguină.

Foliculii pilo-sebacei și ducturile sudoripare joacă un rol minor în absorbția percutanată.

Factorii care influențează absorbția percutanată sunt reprezentați de creșterea temperaturii cutanate și hidratarea pielii.

Lipidele și substanțele liposolubile trec mai ușor, în timp ce substanțele organice cu grupări hidrofile se absorb mai încet. Moleculele mici, solubile atât în lipide cât și în apă, sunt cele mai ușor absorbite.

Variațiile regionale ale permeabilității cutanate pot fi în general explicate prin grosimea diferită a stratului cornos.

Pielea atinsă de dermatoze sau supusă acțiunii unor chimicale (solvenți, denaturanți, surfactanți) este mult mai permeabilă decât pielea intactă. Pansamentele ocluzive, prin creșterea hidratării și a temperaturii cutanate, duc de asemenea la creșterea absorbției unor substanțe.

13. FIZIOLOGIA GLANDELOR ENDOCRINE

Clasic, se admite că glandele endocrine sunt glande fără canale secretoare, ale căror produși de secreție se varsă direct în umorile organismului în vederea transportării lor pe cale sanguină și influențării în sens stimulator sau inhibitor a organelor-țintă, plasate de regulă la distanță de teritoriul secretor. Ca teritorii secretoare de substanțe biologice active denumite hormoni, ele participă – alături de mediatorii chimici ai sistemului nervos simpatico-parasimpatic, cataboliții și principalii ioni – la reglarea neuro-umorală a tuturor funcțiilor organismului. Împreună cu sistemul nervos, glandele endocrine coordonează și adaptează activitatea diverselor țesuturi și organe la variațiile mediului intern sau extern.

Scurt istoric. Ideea existenței unor glande cu secreție internă aparține lui Cl. Bernard (1855), care a constatat, prin dozări comparative de glucoză în sângele recoltat din vena portă și venele suprahepatice, că ficatul lansează mari cantități de glucoză în sânge. De la funcția glucosecretoare a ficatului s-a trecut la generalizarea fenomenului, emițându-se ipoteza că, în afara glandelor care-și revarsă produșii de secreție la exterior prin canale diferențiate, există o altă categorie de teritorii secretoare, ale căror secreții sunt preluate și vehiculate în întregul organism de către mediul intern. O astfel de substanță a fost pusă în evidență de Vulpian (1856) în sângele efluent suprarenal cu ajutorul perclorurii de fier. În prezența acesteia, sângele recoltat din vena suprarenală se colora în verde, datorită nucleului pirocatehinic al adrenalinei secretate de glanda medulosuprarenală. Ulterior, Lancereaux (1877) atrage atenția asupra rolului endocrin al pancreasului, iar Brown Séquard (1889–1890) atribuie rol de glande cu secreție internă hipofizei și gonadelor. El este de altfel printre primii care demonstrează rolul stimulant al extractelor testiculare asupra funcției gonadelor masculine, comportamentului sexual și activității psihosomatice în general.

Din punct de vedere al localizării, glandele endocrine se împart în: centrale (hipofiză, hipotalamus, pineală) și periferice (tiroidă, paratiroide, suprarenale, pancreas, gonade, rinichi, cord, timus, stomac, intestine, placentă).

Denumirea de hormon, dată inițial substanțelor cu rol de mesageri chimici secretate de glandele endocrine, vine de la cuvântul grecesc *hormao* (a stimula), fiind introdusă în fiziologie de către Bayliss și Starling (1902), cu ocazia cercetărilor privind reglarea secreției pancreatice de către o substanță secretată de mucoasa duodenală (secretina) și transportată pe cale sanguină la nivelul acinilor pancreatici.

În felul acesta, noțiunea de glandă endocrină a fost întregită cu cea de hormon și extinsă la toate substanțele chimice purtătoare de informații deversate în sânge în vederea transportării lor la distanță și a modulării unor procese celulare preexistente prin intermediul receptorilor hormonalți specifici.

În ultimul timp însă, această definiție nu mai este absolută, datorită descoperirii în afara efectelor la distanță (endocrine clasice), a acțiunilor apropiate de celulele secretoare (paracrine) sau direct asupra acestora (autocrine).

Factorul de creștere de tip insulinic (IGF-1), care se comportă atât ca substanță endocrină, cât și ca paracrină și autocrină, este o ilustrare a dificultății clasificării.

Structură și funcții. Noțiunea de hormon a fost extinsă ulterior și la mediatorii chimici, denumiți impropriu neurohormoni, precum și la o serie de substanțe rezultate din metabolismul tisular, cunoscute actualmente sub numele generic de hormoni locali, tisulari sau factori autacoizi (proprii), cum sunt histamina, serotonina, plasmakininele, prostaglandinele, sistemul renină-angiotensină, citokinele și chiar

bioxidul de carbon (hormon respirator). Contrar produșilor de secreție ai glandelor endocrine, hormonii locali secretați de celulele neuro-glandulare ale sistemului endocrin difuz, denumit și paracrin sau APUD (*Amine Precursor Uptake and Decarboxylation*), acționează la locul de formare, participând ca factori de autoreglare și modulare locală a diverselor forme de activitate tisulară. Ambele categorii de hormoni acționează asupra organelor-țintă prin intermediul unor receptori specifici. În unele cazuri, celulele endocrine sunt celule-țintă pentru alți hormoni.

Limitând conținutul noțiunii de hormon la produșii de secreție ai celor opt glande endocrine (hipofiză, tiroidă, paratiroide, pancreas endocrin, corticosuprarenale, medulosuprarenale, gonade, epifiză), aceștia pot fi împărțiți în: hormoni de natură steroică (hormonii corticosuprarenali și sexoizi), polipeptidică (hormonii hipofizari, pancreatici și paratiroidieni), aminoacidică (hormonii tiroidieni și medulosuprarenali).

Estimarea secrețiilor hormonale: metodele de identificare și dozare a hormonilor s-au bazat mult timp pe determinări biologice, respectiv pe măsurarea unora din efectele produse de aceștia *in vitro* sau *in vivo*. De la dozările biologice s-a trecut la metodele fizico-chimice spectro-fotometrice și fluorimetrice, precedate de separări cromatografice.

Un mare pas înainte pe linia identificării și estimării secrețiilor hormonale l-a constituit introducerea tehnicii radioimunologice de către Berson și Yalow (1957).

Principiul dozărilor radioimunologice este următorul: proba – care poate fi plasmă, urină, LCR sau extract tisular – este incubată cu o cantitate prestabilită de hormon marcat radioactiv (trasor), pe de o parte, și cu anticorpii respectivi, pe de altă. Moleculele de hormon neradioactiv din probă intră în competiție cu moleculele de hormon marcat pentru locurile active ale anticorpului. Concentrația locurilor active (de legare) fiind fixă și limitată, creșterile progresive ale numărului de molecule hormonale neradioactive din proba de cercetat vor disloca un număr corespunzător de molecule de hormon marcat de pe locurile active ale anticorpilor. La sfârșitul perioadei de incubare, moleculele de hormon marcat sunt separate de cele care sunt libere. Radioactivitatea fracțiilor legate și liberă este măsurată în vederea calculării cantității de hormon în funcție de curba standard generată de incubarea unor cantități veritabile de hormon cu concentrații identice de trasor și anticorp. În cazul în care concentrația hormonului în probă este mare, procentajul de radioactivitate restantă în fracția legată va fi mic și invers.

Specificitatea determinărilor radioimunologice este asigurată de reacția hormonului cu locul de legare de pe molecula anticorpului specific. Hormonii de natură proteică posedă de regnlă proprietăți antigenice, anticorpoformatoare. În cazul catecolaminelor, steroizilor, hormonilor tiroidieni sau al peptidelor cu greutate moleculară mică, se recurge la cuplarea acestora cu o proteină mai mare (albumină) pentru a asigura formarea de anticorpi specifici prin imunizarea unui animal oarecare. Marea sensibilitate a metodelor radioimunologice are la bază constanțele de asociere înalte ale reacției de tip antigen-anticorp. Precizia lor este asigurată de specificitatea, simplitatea și automatizarea tehnicilor de determinare.

Odată secretată, o moleculă hormonală se leagă de un transportor plasmatic specific, complexul fiind apoi transportat către țesuturi aflate la distanță. Există transportori plasmatici proteici pentru fiecare din clasele de hormoni.

Transportorii pentru hormonii peptidici previn distrugerea acestora de către proteazele plasmatiche. Transportorii hormonilor steroizi și tiroidieni permit acestor substanțe foarte hidrofobe să fie prezente în plasmă în concentrații mult mai mari decât le-ar permite solubilitatea lor în apă. Transportorii pentru hormonii cu moleculă mică, derivați din aminoacizi, nu permit filtrarea lor renală, astfel prelungindu-le timpul de înjumătățire plasmatică.

Acțiuni biologice: pe plan funcțional, implicațiile normale și patologice ale glandelor cu secreție internă au fost puse în evidență prin observații clinice verificate pe animale de laborator, la care s-au urmărit atât consecințele exstirpării chirurgicale a glandelor, cât și efectele administrării hormonilor sau extracțelor glandulare respective. Majoritatea hormonilor ca mesageri primi acționează la nivelul unor celule-țintă prin intermediul receptorilor specifici, cu participarea sistemului adenilat ciclază-cAMP sau a ionilor de calciu, ca mesageri biochimici celulari de ordinul al doilea. Complexul hormon-receptor rezultat induce schimbări

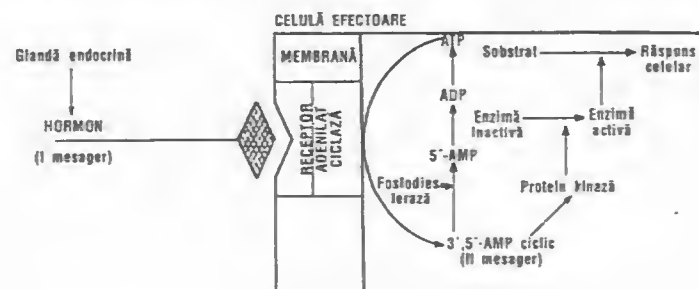


Fig. 13.1. Participarea sistemului adenilat ciclază-cAMP la producerea acțiunilor biologice ale hormonilor.

în subunitățile reglatoare și catalitică ale adenilat ciclazei membranare, generând cAMP din ATP celular, cu consecințe metabolice și funcționale multiple.

Secvența evenimentelor biochimice generatoare de cAMP ca cel de-al doilea mesager celular este arătată în fig. 13.1. Printr-un astfel de mecanism acționează în sens stimulator: ACTH, TSH, LH, FSH, ADH, glucagonul, parathormonul, secretina, catecolaminele, liberinele hipotalamice și mulți alți hormoni.

Receptorii hormonalni pot fi clasificați în membranari, citoplasmatici și nucleari. În timp ce receptorii hormonilor peptidici au sediul membranar, cei steroici sunt localizați intracelular fie în citoplasmă, fie în nucleu. Excepție fac receptorii hormonilor tiroidieni cu sediul atât membranar, cât și nuclear (fig. 13.2).

Unii hormoni, cum sunt steroizii, de exemplu, acționează asupra nucleului, reglând sinteza de ARN mesager; alții se comportă ca veritabile trofine eliberatoare de hormoni (trofinele hipofizare).

Funcțiile sistemului endocrin constau în accelerarea sau încetinirea reacțiilor chimice celulare necesare menținerii echilibrului homeostazic și adaptării metabolice, structurale și funcționale a diverselor țesuturi și organe la necesitățile variabile ale organismului. În general, hormonii asigură controlul funcțiilor metabolice, începând cu transportul transmembranar al substanțelor folosite la nivel celular în scop plastic, energetic sau funcțional și sfârșind cu procesele de creștere sau secreție glandulară. Ei intervin în reglarea funcțiilor metabolice, concomitent sau succesiv cu reacțiile nervoase somato-vegetative, după cum sunt secretați ca răspuns la stimulii nervoși sau ca urmare a stimulării altor glande endocrine. Tipic este cazul hipofizei, a cărei secreție este sub control nervos și care stimulează la rândul său activitatea secretorie a majorității glandelor endocrine. Relațiile dintre hormoni pot fi de tip aditiv sau antagonic, realizate fie la nivelul receptorului, fie la nivelul verigii neuro-endocrine reglatoare.

Autoreglarea secrețiilor hormonale are la bază prelucrări de informații și decizii de tip cibernetic. Celula endocrină influențează prin mesagerul chimic hormonal celula-țintă care, la rândul ei, acționează asupra celulei endocrine

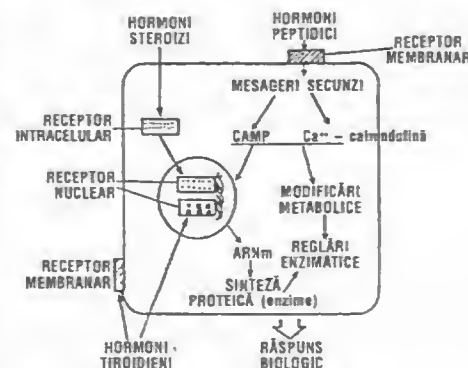


Fig. 13.2. Efectele hormonilor la nivel celular.

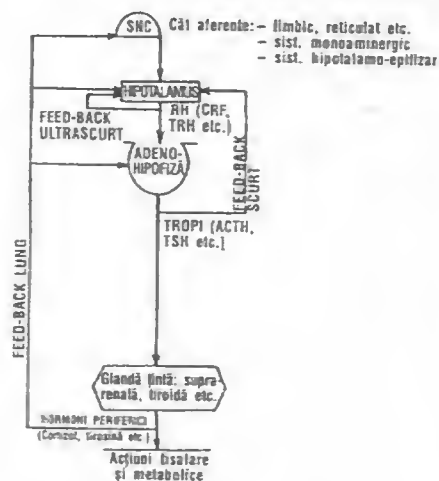


Fig. 13.3. Diferite tipuri de feed-back-uri centrale.

prin mecanisme de *feed-back* negativ sau pozitiv. Autoreglarea prin *feed-back* negativ inhibă secreția hormonului respectiv, în timp ce *feed-back*-ul pozitiv o amplifică. Producerea reacțiilor de retrocontrol hormonal, de un tip sau altul, se realizează fie pe cale umorală (între doi sau mai mulți hormoni, între hormoni și substanțe minerale – Ca, P, Na, K), fie prin mecanism nervos (colinergic, adrenergic, gabaergic, peptidergic) sau de către ritmurile biologice (diurne, somn-veghe, ciclul estral, ritmul sezonier sau de creștere). În cazul mecanismelor cibernetice centrale, *feed-back*-ul poate fi lung, scurt și ultracurt, după cum sistemul hipotalamo-hipofizar este influențat de către hormonii periferici, hipofizari sau hipotalamici (fig. 13.3).

În felul acesta, glandele endocrine sunt autoreglate de efectul propriei lor activități.

13.1. HIPOFIZA

Hipofiza, sau pituitara, este o mică glandă situată la baza creierului, care asigură, prin legăturile sale nervoase și vasculare cu hipotalamusul, controlul neuro-endocrin al metabolismelor, creșterii și reproducerii. Deși a fost descoperită de Galenus încă din secolul al II-lea al erei noastre, rolul său endocrin n-a putut fi stabilit decât la sfârșitul secolului trecut, la scurt timp după efectuarea primelor hipofizectomii experimentale (Brown Séquard, 1890).

Consecințele morfo-funcționale variate ale extirpării hipofizei dublate de efectele multiple ale administrării de extracte hipofizare (stimularea creșterii, hipertrofia gonadelor etc.) sugerau rolul secretor multiplu al acesteia, cu acțiuni diferențiate asupra principalelor glande cu secreție internă. La rândul lor, cercetările de anatomie și histologie privind relațiile neuro-vasculare dintre hipofiză și hipotalamus au dus la descoperirea circulației portale hipofizare de către Popa și Fielding (1930) și la consolidarea conceptului actual de complex hipotalamo-hipofizar. Evidențierea neurosecreției hipotalamice de către Scharer (1928–1936) a determinat pe unii autori (Roussy și Mosinger, 1938) să atribuie hipotalamusului rolul unei veritabile glande diencefalice, iar pe Harris (1945) să considere hormonii hipotalamici drept neurohormoni. Identificarea și stabilirea structurii chimice a acestora de către Schally, Guillemin și Yalow a fost onorată cu premiul Nobel în 1977.

13.1.1. DATE MORFO-FUNCȚIONALE GENERALE

Situată sub hipotalamus, în șaua turcească a corpului sfenoidului, hipofiza are la om o formă ovalară, „îo bob de fasole”, cu diametrul de aproximativ 1 cm și greutatea de 0,6–0,7 g. Doar la femeia gravidă greutatea glandei este ceva mai mare (1 g). La nou-născut, hipofiza cântărește deja 0,13 g.

Considerată pitic morfologic și gigant funcțional, la mamifere, glanda este formată din doi lobi, cu structură și funcții distincte. Lobul anterior, având structură glandulară, a fost denumit adenohipofiză, iar cel posterior, bogat în țesut nervos, este cunoscut sub numele de neurohipofiză, sau retrohipofiză. Un al treilea lob intermediar se găsește la pești, batracieni și alte vertebrate primare. În cazul mamiferelor, acesta

fiind slab reprezentat, aparține adenohipofizei. Cei doi lobi hipofizari au origine embriologică diferită. În timp ce adenohipofiza provine din puna lui Rathke, formațiune epitelială oro-faringiană, neurohipofiza este o emanație a sistemului nervos diencefalic, cu care rămâne în relații de continuitate prin tractusul hipotalamo-hipofizar. Ca parte componentă a țigii pituitare, acesta asigură migrarea materialului neurosecretor, format din hormonii retrohipofizari și o proteină transportoare, numită neurofizină, de la nivelul nucleilor supraoptic și paraventricular ai hipotalamusului anterior la hipofiza posterioară. Legăturile dintre hipotalamus și hipofiza anterioară sunt, din contră, predominant vasculare, realizându-se pe calea circulației portale hipotalamo-hipofizare (fig. 13.4).

Poziția anatomică a hipofizei în imediata vecinătate a hipotalamusului nu este așadar o simplă coincidență embriologică.

Cele două componente ale complexului hipotalamo-hipofizar, deși constituie entități structurale distincte, se comportă ca un tot unitar. Grație acestor particularități anatomo-fiziologice ale complexului hipotalamo-hipofizar, hormonii retrohipofizari sunt sintetizați în hipotalamus și doar depozitați în hipofiză, iar cei adeohipofizari apar secretați de glandă numai sub influența unor factori hormonal de eliberare, de proveniență hipotalamică, denumiți liberine. Fiziologia hipofizei este astfel intim legată de aceea a hipotalamusului, care, comportându-se ca o veritabilă masă de comandă, transmite pe cale nervoasă și umorală mesajele eliberatoare de hormoni hipofizari sosite din întregul organism. În timp ce tractusul hipotalamo-hipofizar favorizează deplasarea produșilor de neurosecreție hipotalamică spre hipofiza posterioară, circulația portală asigură atât controlul umoral hipotalamic asupra secreției hormonale adenohipofizare, cât și autoreglarea acesteia de către hormonii circulanți secretați de glandele periferice (fig. 13.5).

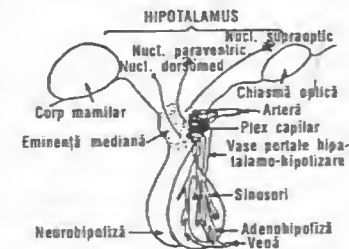


Fig. 13.4. Sistemul port hipotalamo-hipofizar (după Guyton, 1966).

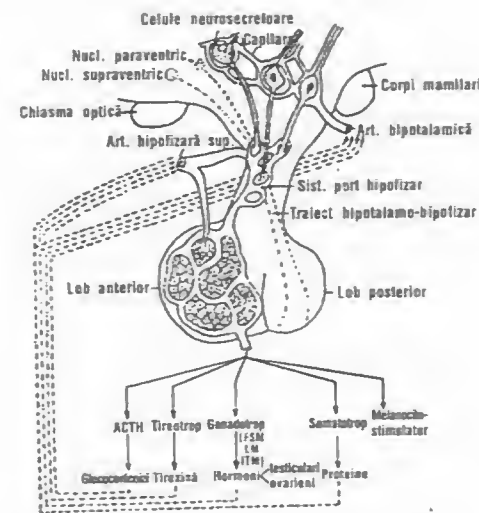


Fig. 13.5. Schema relațiilor dintre hipotalamus, hipofiză și glandele-țintă.

13.1.2. FUNCȚIILE HIPOFIZEI

Funcțiile variate ale hipofizei au fost stabilite cu ajutorul ablațiilor și administrării de extracte sau hormoni hipofizari.

Hipofizectomia, deși compatibilă cu viața, provoacă o gamă variată de dereglări metabolice, cu consecințe morfo-funcționale diferite la tânăr față de adult.

La animalele tinere încetează creșterea tuturor organelor și țesuturilor, ajungându-se la nanismul hipofizar experimental, caracterizat prin insuficiența dezvoltării somatice, absența maturității pubertare și atrofia glandelor tiroide și suprarenale.

La animalul adult, simptomatologia apare mai puțin spectaculoasă în lipsa tulburărilor de creștere. Ablația hipofizei este urmată de instalarea progresivă a unei insuficiențe gonadale, care duce în scurt timp la regresia sau chiar dispariția caracterelor sexuale primare și secundare. La mascul, atrofia testiculară se însoțește de impotență, iar la femelă dispar maturitatea foliculară și ovulația. În plus, adultul hipofizectomizat prezintă atrofia tiroidei și suprarenalelor întâlnită la animalul tânăr cu răsunetul metabolic corespunzător (tendință la hipoglicemie, diabet insipid etc.).

La om, insuficiența hipofizară de cauză ereditară, tumorală sau chirurgicală îmbracă un tablou variat, în funcție de vârstă și intensitatea fenomenelor de hipopituitarism (complet sau parțial). Caracteristic este cazul nanismului hipofizar, în care deficitul de creștere nu se însoțește de tulburări nervoase.

Administrarea repetată de extracte hipofizare îndepărtează, ca și grefele de glandă, consecințele metabolice, morfologice și funcționale ale hipofizectomiei. Efecte similare, dar mai limitate, se obțin după tratamentul de substituție cu hormoni hipofizari. Aceștia se împart în hormoni adenohipofizari și retrohipofizari, după cum sunt secretați de hipofiza anterioară sau posterioară.

Primii îndeplinesc rol morfogenetic, metabolic și reglator al gonadelor, tiroidei și corticosuprarenalelor. La rândul lor, hormonii retrohipofizari participă la reglarea diurezei, motilității uterine și secreției lactate. În ansamblu, hipofiza guvernează procesele normale de reproducere, creștere și nutriție. Acțiunile sale fiziologice multiple se realizează prin hormonii specifici adeno- și retrohipofizari.

13.1.3. HORMONII ADENOHIPOFIZARI ȘI CONTROLUL HIPOTALAMIC AL ACESTORA

Hipofiza anterioară secretă șapte principalii hormoni, cu structură chimică și acțiuni fiziologice proprii. Termenul generic de tropine sau trofine hipofizare dat acestora vine de la cuvântul grecesc *tropeo* = a se orienta spre, sau/și *trofos* = a nutri. În afara tropilor hipofizari, adenohipofiza eliberează o serie de peptide biologice active, prevăzute cu proprietăți fiziologice insuficient cunoscute, de tipul lipotropinei și endorfinelor dintr-un precursor comun cu ACTH, denumit proopiomelanocortin (POMC).

După structura chimică, hormonii adenohipofizari se împart în *hormoni holoproteici* și *glicoproteici*. Din prima categorie – a **hormonilor holoproteici** cu structură peptidică simplă – fac parte *hormonul de creștere* (somatotrop sau *STH*), *hormonul adrenocorticotrop* (*ACTH*), *prolactina* (mamotrop) și *hormonul melonotrop* (melanocitostimulator sau *MSH*). **Hormonii adenohipofizari glicoproteici** sunt reprezentați de *hormonul tireotrop* (*TSH*) și de cele două gonadotrofine, stimulatoare la femeia a maturității foliculare (*FSH*), pe de o parte, și transformării foliculului restant în celule luteale secretoare de hormon luteinizant (*LH*), pe de altă parte. La bărbat, *FSH* stimulează spermatogeneza, iar *LH* secreția de hormoni testiculari.

Spre deosebire de hormonul de creștere și prolactină, care sunt secretați de celulele acidofile adenohipofizare, hormonii adrenocorticotrop, tireotrop, foliculostimulant și luteinizant par a fi produși de secreție ai celulelor bazofile. Semnificația fiziologică a celulelor cromofobe, ascretore, din hipofiza anterioară, este necunoscută încă. Acestea par să îndeplinească rol de celule precursoră pentru cele două tipuri de celule cromofile, secretoare.

În afara celulelor glandulare, un rol important în sinteza și eliberarea hormonilor adenohipofizari revine celulelor hipotalamice neurosecretoare. Acestea posedă capacitatea de a forma factorii activatori sau inhibitori ai secreției hipofizare. Conținând numeroase celule nervoase prevăzute cu proprietăți secretoare, hipotalamusul deține o importantă funcție neuro-endocrină. Alături de hormonii retrohipofizari, care vor fi

prezența ulterioară ca produși de neurosecreție hipotalamică, au fost identificați o serie de neurohormoni hipofizotropi denumiți *liberine* sau *statine*, după cum produc eliberarea sau inhibarea secreției de hormoni adenohipofizari.

În funcție de teritoriul țintă, hormonii adenohipofizari se împart în glandotropi și non-glandotropi. Din prima categorie fac parte *ACTH*, *TSH*, *LH* și *FSH*, iar din cea de a doua categorie *STH*, *PRL* și *MSH*.

13.1.3.1. Hormonii hipofizotropi hipotalamici

Fiecare din hormonii adenohipofizari este sub controlul unuia sau a doi neurohormoni hipotalamici, transportați pe calea umorală a sistemului port hipofizar de la nivelul neuronilor parvocelulari ai regiunii infundibulo-tuberiene și eminenței mediane la hipofiza anterioară. Exceptând factorul inhibitor al prolactinei (*PIF*), care a fost identificat cu dopamina, aceștia au structură chimică peptidică și se comportă ca factori trofici hipofizari activatori (*liberine*) sau inhibitori (*statine*) ai biosintezei și eliberării de hormoni adenohipofizari. Până în prezent au fost izolați și studiați din punct de vedere al rolului fiziologic următorii neurohormoni hipofizotropi hipotalamici:

a) *hormonul eliberator de corticotrofină* (*CFR*, *corticoliberină*), secretat de eminența mediană a hipotalamusului, este cunoscut încă din 1955, de la cercetările lui Saffran și Schally. Datorită unor secvențe aminoacidice identice cu ale vasopresinei, inițial s-a crezut că aceasta ar fi substanța activă *in vivo*. Ulterior s-a precizat că *CRF* este un polipeptid compus din 41 de aminoacizi, ale cărui principale funcții constau în activarea eliberării atât de corticotrofină, cât și de beta-endorfină dintr-un precursor adenohipofizar comun, denumit proopiomelanocortin. La rândul său, beta-endorfina formată din 31 de aminoacizi face oficiul de factor inhibitor al *ACTH* hipofizar;

b) *hormonul eliberator de gonadotrofine* (*GnRH*, *gonadoliberină*) este un peptid format din 10 aminoacizi și prevăzut cu proprietăți activatoare ale secreției atât de *FSH*, cât și de *LH*. Acțiunea predominantă asupra eliberării uneia din cele două gonadotrofine se datorește modificărilor de reactivitate produse de hormonii ovarieni;

c) *hormonul eliberator de tireotrofină* (*TRH*, *tireoliberină*) este un tripeptid cu structură: Glu-His-Pro-NH₂, și cu acțiuni stimulative ale eliberării nu numai de tireotrofină, ci și de prolactină;

d) *factorul inhibitor de prolactină* (*PIF*), eliberat de nucleul arcuat hipotalamic, a fost identificat cu dopamina (*DA*), ale cărei acțiuni inhibitoare sunt cunoscute la nivelul diverselor structuri nervoase centrale;

e) *hormonul eliberator de somatotrofină* (*STH-RH*, *somatoliberină*) este un polipeptid format din 40-44 de aminoacizi. El a fost izolat de Schally și colab. (1970) atât din hipotalamus, cât și din pancreas. Deficitul secretor de somatoliberină hipotalamică duce la nanism hipofizar, iar hipersecreția acesteia poate genera fenomene de acromegalie prin excesul de hormon somatotrop circulant;

f) *factorul inhibitor de somatotrofină*, denumit și somatostatin (*SS*), este un peptid constituit din 14 aminoacizi. Ca și somatoliberina, somatostatina se găsește nu numai în hipotalamus, ci și în pancreas și tubul digestiv. În afara inhibării secreției de hormon somatotrop, somatostatina posedă și alte acțiuni inhibitoare asupra sintezei și eliberării de *TSH*, insulină, glucagon, pepsină, *GIP*, *VIP*, precum și a secreției gastrice.

Controlul secreției adenohipofizare de către neurohormonii hipotalamici este schițat în fig. 13.6.

În afara neurohormonilor hipofizotropi menționați, hipotalamusul influențează în sens activator sau inhibitor secrețiile hormonale adenohipofizare și prin intermediul mediatorilor chimici și al neuromodulatorilor locali peptidici denumiți *cibermine*.

Printre mediatorii chimici din hipotalamus figurează monoaminele (noradrenalina, dopamina, serotonina), acetilcolina, acidul glutamic, acidul gamma-aminobutiric, glicina, substanța P, neurotensina și chiar somatostatina. Având la bază procese de formare și eliberare identice cu ale factorilor hormonal hipotalamici, aceași substanță poate îndeplini funcții diferite, fie de mediator chimic (neurotransmițător), fie de neurohormon, după cum s-a eliberat în fanta sinaptică sau în circulația portală hipotalamo-hipofizară.

La rândul lor, ciberminele sunt neuropeptide cu rol modulator local. Din această categorie fac parte peptidele opioide (endorfine, enkefaline, dinorfine), substanța P, neurotensina, angiotensina, *VIP*, somatostatina etc. Acțiunea modulatoră a ciberminelor diferă de a neurohormonilor și mediatorilor chimici,

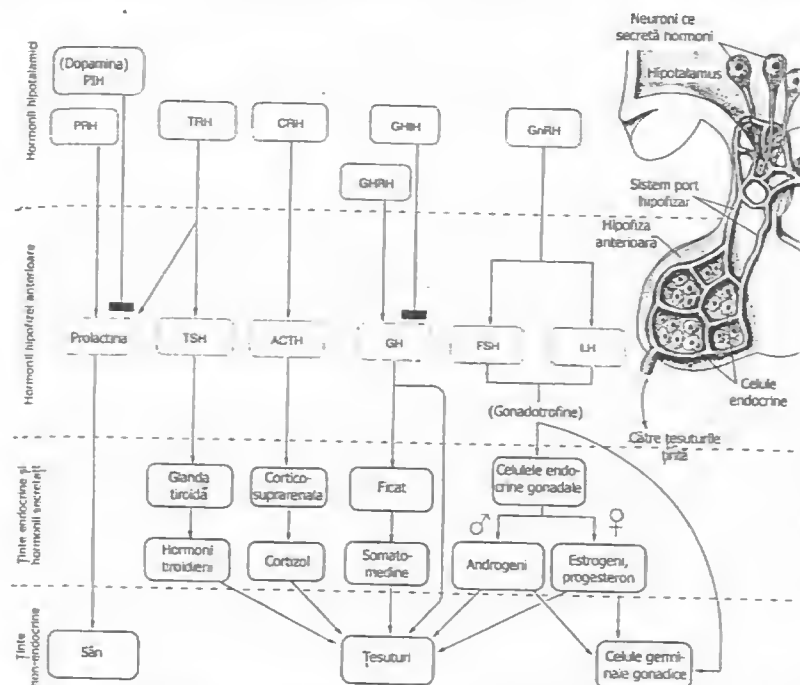


Fig. 13.6. Influența hormonilor hipofizotropi hipotalamici asupra secreției adenohipofizare și a diverselor ținte tisulare.

fiind lentă și localizată în jurul neuronului secretor. În ansamblu, producții de neurosecreție hipotalamică (neurohormoni, mediatori chimici și cibernine) asigură controlul permanent al sistemului nervos asupra secreției de hormoni hipofizari și, prin intermediul acestora, realizează principalele reacții neuro-endocrino-metabolice periferice de adaptare la condițiile și solicitările variabile ale organismului. La rândul lor, hormonii secretați de glandele controlate de adenohipofiză influențează în sens pozitiv sau negativ activitatea secretorie a complexului hipotalamo-hipofizar în vederea restabilirii secreției adenohipofizare bazale.

13.1.3.2. Hormonul de creștere

Hormonul de creștere (somatotrop, STH), izolat inițial de Evans (1921) în stare impură din hipofiza de bou, stimulează creșterea și dezvoltarea somatică postnatală. Administrarea sa determină la animalele tinere fenomene de gigantism, ca urmare a stimulării proceselor de creștere, în general, și a oaselor, în particular. Eforturile de extracție și purificare a hormonului au dus, în 1944-1945, la identificarea de către Li și colab. a unei globuline cu greutate moleculară de 45 000 de daltoni în adenohipofiza bovinelor, porcinelor și ovinelor, prevăzută cu proprietăți stimulatorie ale cartilajului de creștere și a oaselor numai la animalele respective. Substanța izolată fiind inactivă la maimuță și om, cercetările de chimie extractivă au fost continuate asupra hormonului de creștere uman.

În 1966, același grup condus de Li izolează din hipofiza umană un polipeptid înalt purificat, cu greutate moleculară de 21 500 de daltoni, format din 188 de aminoacizi. Pentru că produsul satisfacea numai parțial criteriile de activitate biologică la maimuță și om, studiile au continuat, ajungându-se în 1973 (Niall și colab.) la precizarea structurii chimice a hormonului de creștere uman. La om, hormonul de creștere este un peptid liniar, alcătuit din 191 de aminoacizi cu două punți disulfidice și cu greutate moleculară de 22 000 de daltoni. Frația activă prezintă specificitate relativă, întrucât stimulează creșterea și la maimuță, câine și șobolan. Ea este mascată de o moleculă mai mare, diferită de la o specie la alta. Determinările radioimunologice au identificat de altfel două peptide imunoreactive în plasma umană: una cu greutate moleculară mare, de 45 000 de daltoni (*big growth hormone*), care ar îndeplini rol de prehormon la creșterii, și alta cu greutate moleculară mică, de 22 000 de daltoni (*little growth hormone*), adevăratul hormon de creștere uman, format din 191 de aminoacizi.

Lobul anterior al hipofizei umane conține 5-6 mg de hormon somatotrop într-un tip de celule acidofile bogat granulate, ce prezintă 30-40% din celulele cromofile adenohipofizare. Acestea secretă până la 4 mg hormon în 24 de ore. Concentrația sa plasmatică este mai mare la copil decât la adult, atingând în timpul puseurilor de creștere valori de până la 300 mg/litru. Deficitul secretor poate fi supleat cu hormon extras de la primat sau cu hormon de creștere produs de bacterii hibridate cu genă umană prin tehnica ADN recombinant.

Acțiunile biologice ale hormonului de creștere sunt multiple și generale, nelimitate la un anumit organ-țintă, ca în cazul celorlalți hormoni adenohipofizari. Ele sunt legate de specie și constau, în primul rând, în stimularea proceselor de creștere a oaselor, mușchilor, viscerelor, collagenului, țesutului conjunctiv și a celui adipos. La baza lor stau fenomene anabolizante de intensificare a sintezei proteice, dublate de activarea condro- și osteosintezei. Creșterea oaselor se datorește stimulării condrogenezei și calcificării, ca urmare a intensificării activității mitotice a cartilajelor de conjugare și depozitării calciului la nivelul osteoblastelor.

Un factor de sulfatare de origine hepatică, denumit somatomedină, este implicat în producerea efectelor de creștere a cartilajelor și oaselor de către hormonul somatotrop. Incorporarea sulfului radioactiv în condroitinsulfatul cartilajului de conjugare apare de trei ori mai intensă la animalul normal decât la cel hipofizectomizat. Paralel cu scăderea hormonului de creștere scade și somatomedina din sânge și invers în perioada creșterii pubertare.

Somatomedina este un peptid cu greutate moleculară de 7 000 de daltoni. Având structură asemănătoare proinsulinei, a fost denumită și factor insulenic de creștere. Singurele somatomedine circulante la om sunt factorul de creștere de tip insulenic IGF-I, nmmt și somatomedina C, precum și IGF-II. Acești factori au structuri foarte înrudite cu ale insulinei; hormonul relaxina, cu cele 2 variante ale sale la om, este foarte apropiat structural cu IGF-II. Stimularea creșterii se realizează prin intermediul unor receptori membranari cu sensibilitate parțială la insulină. De aici, efectele hipoglicemice ale somatomedinei și dezvoltarea exagerată a țesuturilor moi în unele cazuri de insulinoame pancreatice. Prin intermediul somatomedinei hepatice, hormonul de creștere stimulează metabolismul cartilajului epifizar și dezvoltarea liniară a oaselor.

Sudarea liniei epifizare la adult, determinată de osificarea cartilajului de conjugare, întrerupe creșterea în lungime a oaselor. STH stimulează factorii de creștere nervoasă, epitelială, fibroblastică, eritropoietică etc. Pigmeii africani prezintă un deficit secretor de somatomedină hepatică. Excesul de hormon somatotrop la adultul cu epifizele sudate va duce la activarea osteosintezei în celelalte sectoare ale osului și la creșterea sa în grosime.

Dintre țesuturile moi, mușchii sunt deosebit de sensibili la hormonul de creștere. Masa musculară crește paralel cu excreția de creatinină, manifestând o rezistență deosebită la efectele metabolice ale insulinei. De altfel, hormonul de creștere se comportă ca un veritabil antagonist fiziologic al insulinei la nivelul mușchilor și țesutului adipos.

Rinichii prezintă, de asemenea, o sensibilitate remarcabilă față de hormonul de creștere. La animalul hipofizectomizat, ei apar mici și cu deficite funcționale atât pe linia filtrării glomerulare, cât și a excreției tubulare. Hipertrofia compensatoare a rinichiului restant de la animalul nefrectomizat unilateral nu se produce în lipsa hormonului de creștere, sugerând rolul acestuia în fenomenele de adaptare renală. Creșteri similare au fost puse în evidență la nivelul ficatului, pancreasului și celorlalte viscere, excepție făcând doar creierul. Îngroșarea pielii și dezvoltarea exagerată a collagenului pot apărea, de asemenea, în prezența hormonului de creștere în exces.

Efecte metabolice: efectele stimulative ale creșterii somatice se datoresc activării proceselor metabolice de sinteză proteică pe seama consumului mărit de aminoacizi și a balanței pozitive a azotului și fosforului. Hormonul de creștere stimulează transportul activ de aminoacizi, captarea și utilizarea lor la sinteza de proteine, mai ales în mușchi. Predominața reacțiilor de sinteză asupra celor catabolice explică bilanțul azotat pozitiv și apariția de proteine nou-formate la nivel ribozomal, chiar după administrare de actinomicină D (inhibitor al sintezei proteice). Fenomenul se datorește stimulării proceselor de decodare și transcripție din nucleu și formării crescute de ARN, care, la rândul său, asigură sinteza mărită de proteine. În plus, hormonul de creștere inhibă degradarea proteinelor și utilizarea lor ca sursă de energie. Aceasta este furnizată de consumul exagerat de acizi grași liberi, mobilizați din țesutul adipos de rezervă. Favorizând mobilizarea și utilizarea lipidelor în scop energetic, hormonul somatotrop realizează un regim de cruțare a proteinelor și glucidelor.

Creșterea proteinelor tisulare sub influența efectelor anabolizante ale hormonului se însoțește de scăderea lipidelor, ale căror mobilizare și conversiune în acizi grași duc prin beta-oxidare la transformarea lor în acetil CoA, în vederea utilizării ca principală sursă de energie. În același timp, somatotropul limitează sinteza de trigliceride din glucoză, accelerând degradarea grăsimilor. Ca urmare a consumului crescut de acizi grași, cântul respirator scade, iar producerea acizilor acetonici și beta-hidroxibutirici se intensifică, predispunând la acumularea de corpi cetonici.

În afara efectelor anabolizante și cetonice, hormonul de creștere exercită cel puțin trei acțiuni asupra metabolismului hidrocarbonat. Acestea sunt: scăderea consumului de glucoză, creșterea depozitării sub formă de glicogen și inhibarea captării sale de către celulă pentru a fi degradată. În lipsa unui consum celular normal, concentrația glucozei din sânge crește cu 50–100%. Pe această bază s-au atribuit hormonului somatotrop proprietăți diabetogene.

Acțiunea sa hiperglicemiantă agravează diabetul pancreatic experimental, care, la rândul său, se ameliorează după hipofizectomie. Houssay și colab. (1936) au semnalat printre primii că ablația hipofizei reduce considerabil hiperglicemia la animalele diabetice. În timp ce hipofizectomia crește sensibilitatea la insulină, hormonul somatotrop o scade, datorită antagonizării efectelor acesteia asupra captării și utilizării glucozei la nivel celular.

Problema relațiilor dintre hormonul de creștere și insulină este mai complexă, deoarece creșterea apare stimulată numai în prezența insulinei. La animalul pancreatectomizat, hormonul de creștere fiind inactiv, s-a presupus că acțiunile sale ar fi mediate de insulină. În realitate, este vorba de o acțiune directă, care interferează cu receptorii și efectele celulare ale insulinei, realizând reducerea consumului de glucoză, concomitent cu pătrunderea aminoacizilor în celulă. Acțiunea directă a hormonului de creștere a fost evidențiată atât *in vivo*, cât și *in vitro*. Dacă se blochează insulina cu anticorpi antiinsulinici, hormonul somatotrop continuă să intensifice pătrunderea acizilor aminați în celulă.

Între efectul anabolizant proteic și cel diabetogen glucidic pare să existe o adevărată balansare, care face ca primul să predomină în perioada de creștere, iar cel de al doilea, la adult. De altfel, testarea biologică a hormonului are la bază proprietățile sale de a stimula creșterea șobolanilor infantili hipofizectomizați sau grosimea cartilajului lor de conjugare la nivelul ȳbizi.

Variațiile secreției de hormon de creștere: testările biologice fiind înlocuite în ultimele decenii cu dozări radioimunologice, s-a putut preciza concentrația plasmatică a hormonului de creștere la diferite vârste, atât în condiții normale, cât și patologice. În plasma nou-născutului se găsesc 18–20 ng/ml, în timp ce la adult valorile medii oscilează în jurul a 0,5–2 ng/ml. Creșterile de peste 3 ng/ml la adult sunt patologice și se însoțesc de manifestări clinice și metabolice de tip acromegalic. Creșteri fiziologice apar în timpul somnului, mai ales în fazele 3 și 4 de somn profund evidențiate electroencefalografic.

Variații în același sens produc stările febrile, stresul de diferite cauze și efortul fizic de performanță. Hipertrofia musculară scheletică și cardiacă la sportivi se realizează cu participarea hormonului somatotrop. Animalele hipofizectomizate nu prezintă hipertrofie cardiacă compensatoare de efort.

Reglarea secreției de hormon de creștere este insuficient cunoscută. Absența unei glande sau organ-tintă face posibilă intervenția mai multor factori nervoși și umorali. O primă informație autoreglatoare o constituie însăși concentrația plasmatică a hormonului de creștere. Prin reacții de *feed-back* scurt, pozitiv sau negativ, aceasta determină stimularea sau inhibarea secreției hipofizare de somatotrop. Ca factori stimulanți nespecifici intervin hipoglicemia, aminoacidemia și hormonii tiroidieni, care acționează sinergic cu STH asupra creșterii somatice.

Atât hipoglicemia insulinică, cât și cea de foame stimulează secreția de hormon somatotrop. Din contră, hiperglicemia determină o scădere promptă a concentrației sale plasmatică. Dintre aminoacizi, arginina este cea mai eficientă și perfuzia cu acest acid aminat se folosește în clinica umană pentru explorarea funcțională a secreției hipofizare de STH.

Contrar hormonilor tiroidieni, estrogenii inhibă secreția hormonului de creștere. Agresiunile nociceptive și stresul în general determină hipersecreție nu numai de ACTH, ci și de STH, prin mecanismul excitării nespecifice a complexului hipotalamo-hipofizar. Leziunile distructive de la nivelul ariei supraoptice, nucleului ventro-median și al jumătății anterioare a eminenței mediane produc o scădere marcată a secreției de hormon somatotrop, demonstrând dependența acesteia de hipotalamus. Extractele de țesut hipotalamic stimulează secreția hormonului de creștere atât *in vivo*, cât și *in vitro*, datorită unui principiu activ, denumit factor de eliberare (*releasing factor*) a STH, sau somatoliberină, menționat deja ca neurohormon hipofizotrop hipotalamic.

În 1973, Guillemin și colab. au izolat o altă fracție peptidică din hipotalamus, denumită somatostatina, care exercită efecte inhibitoare asupra secreției de STH. Contrar somatoliberinei, somatostatina împiedică descărcarea de somatotrop indusă de hipoglicemie. El acționează în sens inhibitor și asupra secreției de insulină și glucagon din pancreas. Semnificația fiziologică a acestor acțiuni periferice este insuficient cunoscută. În afara sursei hipotalamice, există și o secreție gastrică și una intestinală de somatostatina, cu rol deprimant asupra eliberării de gastrină, pepsină, secretină etc. După Guillemin, somatostatina face parte din categoria ciberninelor larg distribuite în organism, pentru a modula acțiunea hormonilor la nivelul organelor-tintă.

La rândul lor, mediatorii cibnici – dopamina, noradrenalina și serotonina – cresc secreția de hormon somatotrop ca urmare fie a stimulării factorului hipotalamic de eliberare, fie a inhibării somatostatinei. Cert este că reglarea secreției hormonului de creștere este asigurată pe căi neuro-umorale multiple – centrale și periferice.

13.1.3.3. Hormonul adrenocorticotrop

Hormonul adrenocorticotrop (ACTH, corticotrofina sau corticostimulina) controlează dezvoltarea și secreția hormonală corticosuprarenală. Izolat în 1943 de Li, Sayers și colab. din hipofizele de oaie și porc, activitatea sa a fost apreciată inițial în funcție de stimularea creșterii țesutului glandular suprarenal. În 1948, Sayers a observat depleția acidului ascorbic adrenal după administrare de ACTH, proporțională cu doza, propunând fenomenul ca metodă de determinare a activității sale hormonale. În 1954, Bell a stabilit structura chimică a ACTH, iar în 1963, Li i-a realizat sinteza.

Din punct de vedere chimic, ACTH este constituit dintr-un lanț polipeptidic, format din 39 de aminoacizi. Mici diferențe legate de specie pot apărea în secvența aminoacizilor din pozițiile 25–33. Acestea nu afectează însă acțiunile hormonului, care depind în ultimă instanță de secvența primilor 24 de aminoacizi. Dintre aceștia, aminoacizii 1–17 sunt indispensabili efectelor hormonale, heptadecapeptidul respectiv fiind de fapt cel mai activ. Primii 13 aminoacizi ai ACTH, regăsindu-se în structura MSH, justifică efectele comune de hiperpigmentare a tegumentelor. Deși este un polipeptid cu greutate moleculară sub 5 000 de daltoni (4 567), ACTH posedă proprietăți antigenice, generatoare de anticorpi specifici.

Sinteza ACTH are loc în celulele bazofile adenohipofizare prevăzute cu mici granulații colorate în roșu, dintr-un precursor cu greutate moleculară de 31 000 de daltoni, denumit proopiomelanocortin. Acesta conține secvențe ale altor peptide hormonale, cum sunt beta-lipotropina, beta-endorfina și hormonul melanocitostimulator. Biosinteza acestora este prezentată în figura 13.7.

Adenohipofiza umană conține aproximativ 250–400 mg de ACTH, suficiente pentru aproape o lună în condiții bazale de viață. Debitul secreției de ACTH variază în limite largi, după cum este vorba de secreția de fond sau de necesitate. Însăși secreția bazală prezintă variații diurne, influențate profund de suprasolicitățile din timpul stărilor de stres. În absența stresului, concentrația plasmatică a ACTH variază de la mai puțin de 10 pg/ml seara, la 20–100 pg/ml dimineața la ora 6. În condiții de stres, conținutul în ACTH al plasmăi poate atinge 200–300 pg/ml sau chiar mai mult. Atât secreția de fond, cât și cea de necesitate a ACTH au fost stabilite cu ajutorul testului Sayers (depleția acidului ascorbic) sau al determinărilor

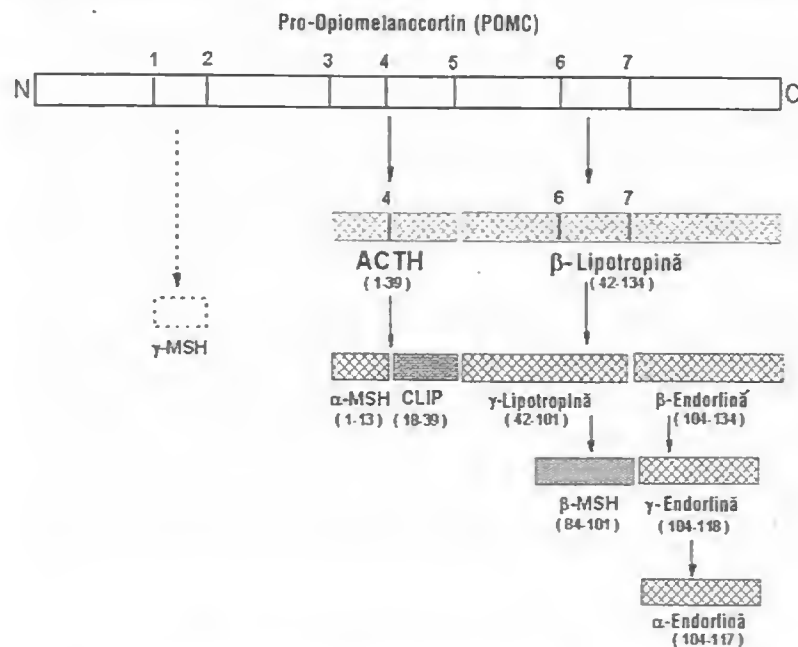


Fig. 13.7. Originea comună a ACTH, MSH și a peptidelor opioide (după King, 1997).

radioimunologice, folosindu-se un antiser specific. O altă modalitate privește debitul hormonilor corticosteroizi din sângele venos suprarenal.

Concentrația plasmatică a ACTH este rezultatul echilibrului dinamic dintre intensitatea proceselor de secreție și cele de inactivare. La om, ACTH dispare rapid din sânge, având o perioadă de înjumătățire de 10–18 minute. Răspunsul cortexului suprarenal dispare mai lent, în aproximativ o oră. În lipsa ACTH hipofizar, glandele corticosuprenale se atrofiază.

Proprietățile biologice ale ACTH sunt primare și secundare. Cele primare aparțin hormonului însuși și constau în stimularea zonei fasciculate a glandei corticosuprenale, secretoare de glucocorticoizi (cortizol și corticosteron). Sub influența ACTH, secreția acestora crește rapid și proporțional cu doza, în intervalul scurt de 7–8 minute. Paralel cu activarea sintezei și secreției de glucocorticoizi, ACTH stimulează zona reticulată și, în mai mică măsură, chiar zona glomerulată a corticosuprenalelor (fig. 13.8).

La animalul hipofizectomizat, cu capsulele suprarenale atrofiate, ACTH restabilește greutatea glandei și aspectul normal al zonelor fasciculate și reticulată. Hipersecreția de glucocorticoizi se însoțește de scăderea acidului ascorbic și colesterolului corticosuprenal, implicat în sinteza hormonilor respectivi.

Referitor la mecanismul intim de acțiune, se admite că efectele stimulatorie ale ACTH asupra secreției corticosuprenale sunt mediate de cAMP. În favoarea acestui punct de vedere pledează faptul că adaosul de ACTH la cupe de jesut

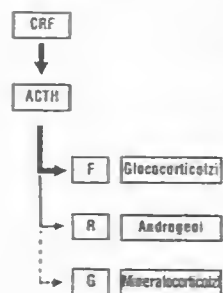


Fig. 13.8. Influența ACTH asupra zonelor: fasciculate (F), reticulată (R) și glomerulată (G) ale corticosuprenalei.

suprarenal incubate *in vitro* crește conținutul acestora în cAMP, care, la rândul său, stimulează steroidogeneza. Mai exact, ACTH activează transformarea colesterolului în pregnenolon, ca primă etapă a biosintezei glucocorticoizilor, cu participarea cAMP.

Proprietățile secundare ale ACTH se datoresc efectelor metabolice ale hormonilor glucocorticoizi, care vor fi menționate la capitolul respectiv. În esență este vorba de activarea metabolismelor glucidic, proteic și lipidic.

Ca acțiuni extracorticosuprenale figurează efectele lipolitice, melanotrope și aldosteronoeliberatoare slabe, asigurând doar 30% din secreția de fond a mineralocorticoizilor.

Dacă acțiunea lipolitică trebuie admisă cu rezervă, întrucât adenohipofiza de oaie conține un hormon peptidic cu structură similară ACTH și proprietăți lipolitice (Li și Cbétien, 1967), activitatea sa melanotropă apare evidentă în insuficiența corticosuprenală în care pielea prezintă pigmentația caracteristică bronzată (boala Addison). Aceasta se datorește fie excesului de ACTH circulant prevăzut cu proprietățile melanocitostimulatoare, fie formării unui produs intermediar de inactivare similar cu MSH.

Reglarea secreției de ACTH se realizează pe cale umorală și neuro-reflexă centrală. Principalul factor umoral îl constituie concentrația sanguină a hormonilor glucocorticoizi, reprezentați la om îndeosebi de cortizol. Sub influența acestuia, secreția de ACTH scade, realizând un veritabil mecanism de *feed-back* negativ, și invers, crește în absența glucocorticoizilor din circulație. Administrarea de extracte corticosuprenale sau de cortizol provoacă de altfel atrofia zonei corticale a suprarenalelor, similară cu cea observată după hipofizectomie. Hipertrofia compensatoare a corticosuprenalei restante după suprarenalectomie unilaterală nu apare la animalul hipofizectomizat sau tratat cu cortizol. Inhibarea biosintezei glucocorticoizilor suprarenali cu metopironă, care blochează 11- β -hidroxilaza, este, din contră, urmată de creșterea secreției de ACTH, ca urmare a deficitului de cortizol circulant. Testul cu metopironă se folosește în clinica umană pentru explorarea secreției de ACTH și a funcției axului hipofizo-suprarenal în general.

S-a dovedit astfel că sinteza și eliberarea ACTH hipofizar depind de concentrația glucocorticoizilor din plasmă (corticosteron și mai ales cortizol). Reglarea secreției de ACTH de către producții eliberate de o glandă periferică se realizează prin *feed-back* lung, în timp ce autoreglarea asigurată de ACTH circulant este consecința relației de tip *feed-back* scurt. Prima modalitate deține un loc mult mai important decât cea de a doua. În afara acestor informații umorale specifice, un rol deosebit revine factorilor nervoși nespecifici de origine extero- și interoceptivă. Aceștia sunt foarte numeroși și polimorfi, începând cu variațiile termice (cald, frig), traumatismele și hemoragiile și sfârșind cu efortul, anoxia, infecțiile sau stările psihoemoționale. Ansamblul stimulilor nociceptivi nespecifici generatori de reacții neurohormonale complexe de adaptare și apărare poartă denumirea generică de stres.

Informațiile stresante nespecifice determină stimularea corticosuprenalei cu participarea obligatorie a ACTH hipofizar. Veriga hipofizo-corticosuprenală este indispensabilă reacțiilor de apărare contra factorilor de agresiune nervoasă și umorală, cunoscute sub numele de sindrom general de adaptare, descris de Selye (1936).

Mecanismul de stimulare a secreției de ACTH în stres este independent de reacțiile de *feed-back* specific dintre cortizol și ACTH. Descărcările de ACTH în stres, fiind de necesitate, sunt imediate și se manifestă înainte de a se fi produs scăderea glucocorticoizilor circulanți.

În ceea ce privește locul de recepție și transmitere a informațiilor stresante la celulele corticotrope adenohipofizare, acesta diferă în funcție de natura umorală sau nervoasă a stimulilor. În cazul stimulilor umorali, acțiunea se exercită direct asupra teritoriului glandular hipofizar. Ca exemplu se poate da influența inhibitorie a excesului de cortizol circulant (fig. 13.9). În sprijinul acțiunii directe pledează continuarea secreției bazale de ACTH în condițiile adenohipofizei transplantate sau cu tija infundibulară secționată. Sensibilitatea hipofizei „izolate” față de cortizolul

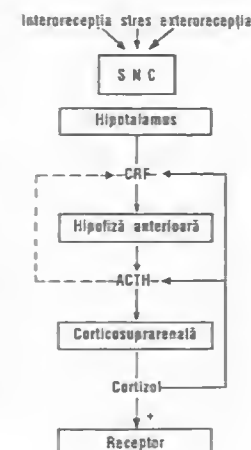


Fig. 13.9. Influențe centrale și periferice asupra secreției de ACTH.

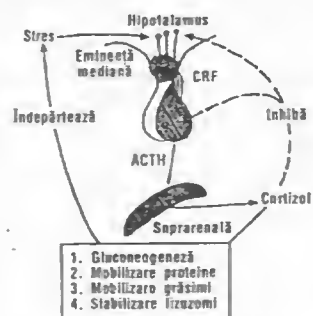


Fig. 13.10. Influența stresului asupra complexului hipotalamo-hipofizo-corticosuprarenal.

Saffran și Schally (1955) au precizat că asupra secreției hipofizare de ACTH controlul hipotalamic se face pe cale sanguină cu ajutorul unui factor de eliberare a corticotrofinei, denumit corticoliberină (CRF sau *corticotrophin releasing factor*), secretat de eminența mediană. Aceasta este un neurohormon, cu structură peptidică, a cărui secreție apare stimulată atât pe cale nervoasă, cât și umorală. În timp ce lipsa glucocorticoizilor circulanți activează secreția de CRF, excesul lor în plasmă o inhibă. Blocând sinteza și secreția de CRF de către neuronii eminenței mediane, dozele mari de cortizol împiedică secreția de ACTH în stres (fig. 13.10).

Rezumând, se poate spune deci că reglarea secreției de ACTH se realizează prin reacții de *feed-back* negativ sau pozitiv pe cale directă hipofizară și indirectă hipotalamică, cu participarea CRF eliberat de la nivelul eminenței mediane.

13.1.3.4. Hormonul tireotrop

Hormonul tireotrop (tireostimulina, TSH) a fost izolat în 1930, aproape simultan de Aron în Franța și Loeb în S.U.A. Sinteza și secreția sa se produc în celulele adenohipofizare cromofile de talie mică, prevăzute cu granulații bazofile. Diferențierea lor are loc târziu la fătusul uman, de abia în luna a VI-a de gestație. La adult, hipofiza conține aproximativ 300 mg de TSH. În plasmă se găsesc valori bazale medii de 1-2 mg/ml, ce pot crește de 50 de ori și mai mult, în cazul secreției de necesitate sau chiar al insuficienței tiroidiene.

Dozarea TSH hipofizar se poate face fie biologic, în funcție de creșterea ponderală a țesutului tiroidian, fixarea iodului plasmatic sau eliberarea iodului hormonal, fie radioimunologic, cu ajutorul unui antiser specific.

Din punct de vedere chimic, TSH este o glicoproteină cu greutate moleculară de 25 000 de daltoni, prevăzută cu proprietăți antigenice. În structura sa intră două subunități inegale, din care una se aseamănă cu LH.

Rolul fiziologic al TSH constă în stimularea sintezei și secreției de hormoni tiroidieni. Efectele sale primare asigură dezvoltarea și funcția secretorie a glandei tiroide. La acestea se adaugă acțiunile secundare produse de hormonii tiroidieni, lansați în circulație sub influența tireostimulinei hipofizare. Hipersecreția de TSH determină hipertrofia glandei tiroide (gușă), iar lipsa sa este urmată de atrofie glandulară.

Administrarea de TSH la animalul normal sau hipofizectomizat determină:

- creșterea debitului sanguin, a consumului de oxigen și glucozei în tiroidă;
- hiperplazia tiroidică, obiectivată prin creșterea de volum și în greutate a glandei și modificările histologice ale celulelor și veziculelor tiroidiene;

circulant, deși persistă, este insuficientă pentru a asigura nevoile variabile de ACTH și glucocorticoizi ale organismului.

De aceea, reglarea directă este dublată de o componentă neuro-umorală indirectă, de origine hipotalamică. În timp ce excitarea electrică a planșeului ventriculului III provoacă efecte similare celor din stres, distrugerea electrolică a acestuia nu mai este urmată de binecunoscuta activare a complexului hipofizo-corticosuprarenal după un stimul nociceptiv. Pe această bază s-a emis presupunerea că stimularea secreției de ACTH se realizează cu participarea hipotalamusului. Acesta îndeplinește atât rol de zonă receptoare pentru glucocorticoizii circulanți, cât și de convergență și integrare a aferențelor senzoriale din întregul organism. Prin intermediul eminenței mediane și al circulației portale de la nivelul tijei infundibulare, hipotalamusul participă la reglarea neuro-umorală a secreției de ACTH.

Implantarea cortizonului sau a altui steroid, ca dexametazonul, în eminența mediană produce la șobolan atrofia cortexului suprarenal prin mecanismul inhibării secreției de ACTH.

Iodul deținând un rol capital în fiziologia glandei tiroide, TSH crește în primul rând concentrația acestuia în coloidul vezicular de la 25 până la 350 de ori. Intensificarea procesului de concentrare se datorează activării pompei membranare de iod.

Cea de a doua acțiune a TSH privește proteoliza tireoglobulinei din coloidul vezicular, în vederea eliberării de tirozină. În continuare este stimulată sinteza de tiroxină prin iodarea succesivă a tirozinei și eliberarea hormonilor tiroidieni din coloidul vezicular.

Între diferitele efecte ale TSH există un decalaj, reprezentat mai întâi de stimularea secreției și apoi a iodocaptării și sintezei hormonale. În timp ce secreția de hormoni tiroidieni apare precoce, atingând valori maxime în primele 2-3 ore de la administrarea TSH, captarea iodului crește de abia în următoarele 24 de ore.

În afara acestor efecte tiroidiene, TSH posedă și o acțiune extratiroidiană, care se exercită asupra țesutului adipos în sens lipolitic, în vederea eliberării de acizi grași liberi.

Atât efectele tiroidiene, cât și acțiunea lipolitică sunt consecința activării adenilat ciclazei membranare și formării de cAMP, ca mesager biochimic la nivel intracelular. Prin intermediul acestuia, TSH își continuă acțiunea, deși este inactivat în 30-40 de minute.

Activitatea TSH hipofizar este dublată mai ales la hipertiroidieni de cea a LATS (factor stimulator tiroidian cu acțiune de lungă durată). Acesta are origine extrahipofizară probabil limfocitară, întrucât se găsește în sângele animalelor hipofizectomizate. La om prezintă mai mult interes fiziopatologic decât fiziologic, sugerând posibilitatea unor hipertiroidii de cauză extrahipofizară.

Reglarea secreției de TSH se realizează pe cale neuro-umorală prin aceleași relații de *feed-back* negativ și pozitiv, cu participarea, de data aceasta, a hormonilor tiroidieni.

Excesul de tiroxină sau triiodotironină în circulație determină inhibarea secreției de TSH, iar deficitul secretor de hormoni tiroidieni provoacă creșterea eliberării de tireostimulină hipofizară. Pe plan histologic, administrarea prelungită de tiroxină, reducând secreția de TSH hipofizar, realizează aspectul tiroidian de repaus. La rândul său, tiroidectomia este urmată de hipertrofia și hiperplazia celulelor tireotrope adenohipofizare. Însoțită de creșterea TSH sanguin. La subiecții supuși unui regim carent în iod, tiroida se hipertrofiază compensator în lipsa materiei prime indispensabile sintezei de hormoni tiroidieni, ducând la apariția gușei cu hipersecreție de TSH. Aceste fapte de observație clinico-experimentală demonstrează că sinteza și secreția de TSH depind într-adevăr de concentrația plasmatică a hormonilor tiroidieni.

În afara informațiilor specifice tiroidiene, secreția de TSH este reglată de numeroși alți factori nespecifici, atât extero- cât și interoceptivi. Ca exemple pot fi date variațiile de temperatură, agresiunile nociceptive, stările psiho-emoționale, diversele etape ale vieții genitale etc. Participarea tiroidiană la lupta contra frigului, de exemplu, este cunoscută. Stimularea glandei tiroide produsă de frig sau alt factor de stres nu mai apare la animalul hipofizectomizat, datorită suprimării secreției de TSH hipofizar. Creșterea glandei tiroide în timpul ovulației se datorește, de asemenea, descărcărilor mai mari de TSH, paralel cu hipersecreția de LH. La baza acestor variații ale secreției de TSH stă nu numai sensibilitatea deosebită a celulelor tireotrope adenohipofizare, ci și prezența unor receptori hipotalamici. Excitarea electrică a unor puncte din hipotalamusul anterior provoacă creșterea descărcărilor de TSH din hipofiză și fenomene de activare tiroidiană, în timp ce distrugerea lor prin electrofiză produce reacții hipofizo-tiroidiene inverse.

Zona hipofizotopă hipotalamică care controlează secreția de TSH găsindu-se în imediata vecinătate a celei de reglare și control al ACTH, informațiile umorale și nervoase (intero- și exteroceptive) care ajung la acest nivel antrenează secreția ambilor hormoni hipofizari la reacțiile de adaptare și apărare contra diverșilor factori de stres. Ca și pentru ACTH, legăturile între hipotalamus și hipofiza anterioară sunt asigurate pe cale umorală.

Factorul neurohormonal hipotalamic cu rol trofic și secretor asupra celulelor tireotrope hipofizare a fost denumit tireoliberină, sau TRF (*thyreotrop releasing factor*).

Folosind aproximativ 200 000 de hipotalamusuri de oaie, Guillemin și colab. (1969) au izbutit să izoleze câteva miligrame de TRF, în vederea stabilirii structurii sale chimice. În prezent se știe că TRF este un tripeptid format din acid piroglutamic, histidină și prolina. Sinteza sa a dus la introducerea testului de explorare a funcției tireotrope hipofizare cu TRF. După 200 mg de neurohormon, secreția de TSH crește, în funcție de capacitatea secretorie normală sau alterată a hipofizei anterioare.

Reglarea și adaptarea secreției de TSH se realizează, deci, pe cale dublă nervoasă și umorală, atât prin acțiune directă, (hipofizară) și indirectă (hipotalamică) a hormonilor tiroidieni, cât și prin mecanismul neuro-reflex al stimulării complexului hipotalamo-hipofizar.

13.1.3.5. Hormonii gonadotropi

Hormonii gonadotropi, descoperiți de Ascheim și Zondek în 1925, au fost discutați de la început prin prisma existenței a două fracții active atât la bărbat, cât și la femeie.

Dualitatea structurală și funcțională a celulelor gonadotrope hipofizare asigură atât dezvoltarea organelor genitale masculine și feminine, cât și apariția caracterelor sexuale secundare.

La femeie, prima fracție favorizează dezvoltarea și maturarea foliculului ovarian, iar cea de a doua este responsabilă de ruptura și transformarea sa în corpul galben. La bărbat, dualitatea secretoare a hipofizei controlează spermatogeneza, pe de o parte, și maturarea glandei interstițiale, pe de alta.

Cele două fracții sunt hormonul foliculostimulant (FSH, foliculostimulina) și hormonul luteinizant (LH), sau hormonul de stimulare a celulelor interstițiale (ICSH).

Activitatea secretorie de gonadotrofine a celulelor bazofile hipofizare începe la 8-9 ani și devine maximă la 13-14 ani, odată cu instalarea pubertății. La animale, aceasta este intermitentă, atingând valori maxime în perioada putului și minime sau nedozabile în afara lui.

La om, secreția de gonadotrofine apare continuă în cazul bărbatului și variabilă la femeie în funcție de fazele ciclului estral, de la pubertate și până la instalarea menopauzei.

Din punct de vedere chimic, gonadotrofinele hipofizare au structură glicoproteică, cu greutate moleculară diferită de 30 000 pentru FSH și de 26 000 în cazul LH.

Dozarea activității lor se poate face cu metode biologice în funcție de creșterea ovarului, testiculului sau prostatei la animalul hipofizectomizat, ori radioimunologic, folosind după caz fie ser anti-FSH, fie ser anti-LH. Conținutul hipofizei în gonadotrofine este sensibil egal la bărbat și la femeie și nu depășește câteva zeci de micrograme. Concentrația plasmatică a acestora prezintă mari variații, mai ales la femeie în timpul ciclului estral.

Proprietățile biologice ale FSH și LH constau în acțiunea sinergică asupra gonadelor femele și masculine, prevăzute cu receptori specifici pentru cei doi hormoni hipofizari. Sinergia funcțională realizată diferă în funcție de sex.

a) La femei, FSH stimulează creșterea ovarului în greutate, dublată de dezvoltarea și maturarea foliculară. Aceasta are loc lunar în prima parte a ciclului și constă în dezvoltarea de regulă a unui singur folicul, constituit din ovul, cavitate centrală și lichid folicular. Excesul de FSH poate induce maturarea a doi sau mai mulți foliculi, predispunând la superfetație în caz de fecundare. FSH nu este însă suficient pentru a duce maturarea la termen și a realiza ruptura foliculului matur, denumită ovulație. Ponta ovariană necesită participarea ambelor gonadostimuline hipofizare. Inversarea raportului FSH/LH în favoarea celui din urmă contribuie la producerea ovulației în ziua a 14-a a ciclului estral și la transformarea celulelor tecale din jurul cratenui folicular restant în corp galben secretor de progesteron. La rândul său, LH nu acționează decât asupra ovarului în prealabil pregătit de FSH. Animalele imunizate contra FSH nu sunt capabile de maturare și ovulație în prezența anticorpilor anti-FSH. În lipsa FSH, acțiunea LH apare limitată la celulele interstițiale ale ovarului, similare cu celulele Leydig din testicul, secretoare de hormoni androgeni.

La femela hipofizectomizată, administrarea de FSH determină maturarea incompletă a foliculului ovarian. Acesta nu secretă estrogeni și nici nu prezintă fenomenul de ovulație. Adaosul de LH finalizează cele două procese foliculare, ca urmare a acțiunii sinergice cu FSH asupra foliculului în curs de maturare.

În afara acestor acțiuni primare de la nivelul ovarului, reprezentate de maturarea lunară a unui folicul, expulzia și transformarea sa în corp galben, gonadotrofinele hipofizare provoacă o serie de modificări ale mucoasei uterine și vaginale determinate de hormonii ovarieni (estrogeni și progesteron).

Ansamblul acestor modificări utero-vaginale constituie ciclul estral, produs de fenomenele secretoare ciclice ovariene, guvernate la rândul lor de cele două gonadostimuline hipofizare. În timpul unui ciclu estral lunar, concentrația sanguină a FSH atinge valori maxime de 10-15 mU/ml în primele 14 zile, pentru a scădea considerabil în faza a doua a ciclului. În schimb, LH crește de la 2-5 mU/ml la începutul ciclului, la 60-80 mU/ml în timpul ovulației și ulterior, în faza a doua a acestuia.

b) La bărbat, FSH crește volumul testicular ca urmare a stimulării procesului de dezvoltare a tubilor seminiferi. Primele stadii ale spermatogenezei sunt activate, fără afectarea numărului de spermatogonii, care necesită și participarea hormonilor testiculari. Aceștia acționează sinergic cu FSH asupra celulelor Sertoli, activând spermatogeneza finală și formarea de spermatozoizi. Spre deosebire de FSH, care activează numai

linia seminală, LH stimulează îndeosebi celulele testiculare interstițiale (celulele Leydig), secretoare de androgeni. Pentru acest motiv, LH se mai numește și ICSH (*interstitial cell stimulating hormone* – hormonul stimulator al celulelor interstițiale). Prin acțiunea indirectă a hormonilor androgeni, ICSH hipofizar stimulează dezvoltarea organelor genitale masculine și caracterelor sexuale secundare. În prezența FSH, acesta desăvârșește spermatogeneza, favorizând formarea spermatozoidilor la animalul hipofizectomizat.

Reglarea secreției de gonadotrofine hipofizare este mai complexă decât a celorlalți hormoni adenohipofizari, datorită particularităților morfo-funcționale ale gonadelor masculine și feminine. La bărbat, capacitatea de reproducere este continuă de la pubertate până la declinul lent al perioadei de senescență. La femeie, din contră, activitatea genitală se caracterizează prin succesiunea regulată a ciclurilor ovariene de la pubertate până la menopauză, dublate de modificări uterine corespunzătoare și întrerupte numai în caz de gestație.

Aceste particularități fac necesară intervenția, mai ales la femeie, a unor mecanisme nervoase și umorale fine în procesul de autoreglare a secreției variabile de FSH, pe de o parte, și LH, pe de alta.

Primul și cel mai important factor de reglare și control al secreției de gonadotrofine hipofizare este reprezentat de hormonii secretați de glandele sexuale. Lipsa lor din circulație la animalele castrate determină creșterea conținutului în FSH și LH al adenohipofizei atât la femelă, cât și la mascul. Această creștere se însoțește de hipersecreția și concentrații plasmatică ridicate atât de FSH, cât și de LH. De altfel, odată cu instalarea menopauzei la femeie și întreruperea secreției ovariene, plasma și urina prezintă valori mai mari de gonadotrofine.

Excesul de hormoni ovarieni sau testiculari provoacă efecte inverse, de frenare a secreției de gonadostimuline hipofizare. Tratatamentul cronic cu estrogeni reduce conținutul plasmatic al celor două gonadotrofine atât la femeie, cât și la bărbat. Progesteronul, deși acționează în același sens, inhibă mai ales secreția de LH. Testosteronul, de asemenea, reduce mai mult secreția de LH decât de FSH.

Ca și în cazul celorlalte stimuline hipofizare, concentrația plasmatică a hormonilor secretați de glandele-țintă (ovare sau testicul) controlează secreția de gonadotrofine prin reacții de *feed-back*, negativ și pozitiv. Variațiile estrogenilor, progesteronului și testosteronului din sânge constituie informația care induce creșterea sau scăderea secreției de gonadostimuline hipofizare.

În afara factorilor hormonal menționați, alte informații din mediul intern și extern concură la asigurarea caracterului adaptativ al secreției de FSH și LH.

Dintre acestea fac parte lumina, stimulii exteroceptivi mecanici, mirosul, temperatura, deficiențele alimentare și factorii psihici. Lumina, de exemplu, este unul din principalii factori externi care imprimă la pasări caracterul sezonier al ovulației, ca urmare a secreției crescute de FSH.

La om, influența luminii este minoră. Singurul fapt demn de semnalat pare a fi vârsta medie a pubertății, mai joasă la populația din zonele tropicale însoțite decât la cea din țările nordice. La rândul lor, stimulii exteroceptivi mecanici, cu punct de plecare de la nivelul mucoasei vulvo-vaginale, produc descărcare de LH și ovulație la iepuroaică și pisică. Nu este exclus ca un astfel de mecanism să favorizeze ovulația și la femeie în cursul sau în urma contactului sexual.

Olfacția contribuie, de asemenea, la reglarea secreției de gonadotrofine hipofizare în scara animală. La unele mamifere, femela în estru emite un miros caracteristic care atrage masculul.

Dintre factorii ambianți, temperatura joasă, captivitatea și stresurile psihice negative influențează substanțial secreția hipofizară de gonadostimuline și, prin intermediul acestora, funcția de reproducere.

Recepția diverselor informații nervoase și umorale are loc la nivelul hipotalamusului, care, după cum se știe, îndeplinește rolul unei veritabile mase de comandă asupra secreției hipofizare. Receptivitatea hipotalamică variază în funcție de impregnarea cu hormoni sexuali. Activitatea electrică a hipotalamusului anterior este profund modificată de hormonii estrogeni. Proporția de neuroni activați de un stimul olfactiv se dublează la șobolancă în timpul perioadei estrale. Dacă secreția bazală de gonadotrofine este sub controlul hipotalamusului mijlociu, cea de necesitate depinde de integritatea morfo-chimică a ariilor supra- și suboptice din hipotalamusul anterior. Prima acționează în sens activator asupra secreției bazale, iar cea de a doua exercită efecte inhibitoare.

Controlul hipotalamic al secreției de gonadotrofine hipofizare se realizează cu ajutorul unui factor neurohormonal de eliberare a FSH și LH, denumit gonadoliberină, sintetizat la nivelul eminienței mediane. Plecând de la faptul că extractele hipotalamice provoacă descărcare de FSH și LH, Schally și colab. (1971)

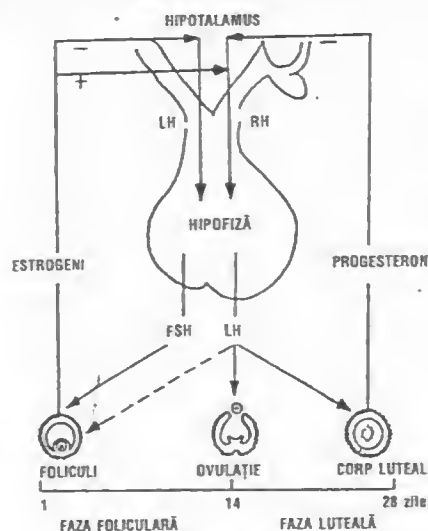


Fig. 13.11. Reglarea secreției de gonadotropine hipofizare de către hormoni gonadali feminini.

Gonadotropinele corionice de origine placentară, fiind eliberate în timpul sarcinii în vederea asigurării proceselor de diferențiere și dezvoltare a organelor genitale la făt, vor fi discutate odată cu fiziologia gonadelor.

13.1.3.6. Prolactina

Prolactina (PRL, hormonul mamotrop sau lactogen) a fost mult timp asimilată cu hormonul somatotrop, care posedă și proprietăți lactogene.

Cercetările din ultimele decenii au precizat că, întrucât lactația este prezentă la femeile cu nanism hipofizar (fără hormon somatotrop), adenohipofiza posedă un hormon cu activitate specifică asupra glandei mamare și secreției lactate. Acesta a fost izolat de Hwang în 1972, stabilindu-i-se structura chimică și proprietățile biologice. Este un polipeptid cu greutate moleculară de 23 000, format din 196 aminoacizi, asemănător din punct de vedere structural cu hormonul de creștere. A fost denumit impropriu hormon luteotrop, datorită faptului că stimulează dezvoltarea și activitatea secretorie a corpului galben (*corpus luteum*) la unele specii, cum este cazul rozătoarelor. La om, prolactina îndeplinește însă exclusiv rol de hormon al lactației. Împreună cu oxitocina asigură secreția lactată în timpul perioadei de alăptare.

Concentrația plasmatică a prolactinei crește progresiv din luna a III-a de sarcină, atingând valori maxime în timpul lactației, pentru a involua și reveni la normal odată cu intrarea glandelor mamare în stare de repaus. Cu ajutorul metodelor biologice (stimularea secreției lactate la cobai, hipertrofia gușei de porumbel) și mai ales radioimunologice, s-a precizat că atât la bărbat, cât și la femeia negravidă, prolactina atinge doar 7 mg/ml de plasmă. În timpul sarcinii și alăptării se constată creșteri marcate de până la 200–250 mg/ml. La femeia care nu alăptează, secreția de prolactină scade rapid după naștere. În timpul alăptării, prolactina inhibă secreția ovariană, întrerupând ciclul ovarian.

Acțiunile sale mamotrope se exercită numai pe glanda mamară maturată cu ajutorul hormonilor ovarieni. La animalele impubere sau castrate înaintea maturității pubertare, hormonul este inactiv.

au izolat din 165 000 de hipotalamusuri de porc un decapeptid care, injectat în carotidă, provoacă eliberare de gonadotropine hipofizare.

Peptidul respectiv, stimulând sinteza și secreția ambelor gonadotropine atât *in vitro*, cât și *in vivo*, se utilizează în practica clinică la explorarea funcțională a complexului hipotalamo-hipofizo-gonadal. Răspunsul secretor predominant de FSH sau LH depinde de „prepararea” adenohipofizei de către hormonii sexuali. Excesul de estrogeni crește efectul factorului hipotalamic de eliberare asupra secreției de LH, concomitent cu inhibarea de FSH și invers, în cazul progesteronului (fig. 13.11).

Întreruperea legăturilor vasculare dintre hipotalamus și adenohipofiză este urmată de suprimarea sau reducerea considerabilă a secreției de gonadotropine. În prezent se admite că hormonii sexuali controlează și reglează secreția de FSH și LH atât pe cale directă hipofizară, cât și indirectă hipotalamică. Complexul hipotalamo-hipofizar implicat în reglarea secreției de gonadotropine îndeplinește rol de *gonadostat*, ce funcționează după un program cu determinarea genetică, modulată și adaptat la necesitățile funcției de reproducere de către secreția glandelor sexuale și aferențele senzoriale extero- și interoceptive.

Efectul mamotrop apare incomplet în afara gestației, devenind complet numai în condițiile acțiunii prealabile a estrogenilor și progesteronului, care inundă organismul gravidei. La mascul, prolactina este activă nu numai asupra glandei mamare tratate cu hormoni ovarieni, ci și asupra organelor genitale. Hormonii gonadali îndeplinesc rol preparativ la nivelul glandei mamare și sferei genitale, asupra căreia acționează sinergic cu prolactina. Sensibilizând veziculele seminale la stimulii nervoși simpatici, prolactina contribuie la actul reflex al ejaculării.

Cât privește efectele proprii ale prolactinei, acestea constau în proliferarea epitelului mamar, dezvoltarea canalelor galactofore, stimularea și întreținerea secreției lactate. Acțiunea lactogenă este mai puternică după expulzia fătului, odată cu scăderea estrogenilor de origine placentară din plasmă. La acestea contribuie și sinergismul cu ACTH, a cărui descărcare crește datorită stresului de expulzie a fătului.

Reglarea secreției de prolactină se realizează predominant pe cale reflexă, ca și în cazul oxitocinei, factorul declanșator fiind mai întâi excitația mecanică a sferei genitale din timpul travaliului și, ulterior, a regiunii mamelonare, produsă de sucțiune. Indiferent de natura informațiilor care declanșează și întrețin secreția de prolactină, acestea antrenează veriga hipofizară prin intermediul hipotalamusului. Contrar hipofizectomiei care întrerupe secreția lactată, leziunile hipotalamice nu o afectează semnificativ. Pe această bază s-a făcut presupunerea intervenției hipotalamusului în sens inhibitor asupra formării și eliberării de prolactină. Și, într-adevăr, extractele hipotalamice s-au dovedit a avea o acțiune inhibitoare atât *in vitro*, cât și *in vivo*, sugerând existența în hipotalamus a unui factor umoral frenator al secreției de prolactină. Acest *prolactin inhibiting factor* (PIF) eliberat de hipotalamus este dopamina. În sens activator pare să acționeze factorul eliberator al tireotrofinei (TRH). Rolul său fiziologic în reglarea secreției de prolactină este insuficient cunoscut.

13.1.3.7. Hormonul melanotrop

Hormonul melanotrop (melanocitostimulator, MSH) este produsul de secreție a lobului intermediar, bine individualizat doar la vertebratele inferioare (pești, batracieni). La mamifere, și îndeosebi la om, acesta face parte integrantă din hipofiza anterioară. MSH a fost izolat în 1955 de Lerner și Lee din hipofiza de porc, identificându-se ulterior două fracții polipeptidice, denumite alfa-MSH și beta-MSH.

Prima fracție (alfa-MSH) este un tridecapeptid identic cu primii 13 aminoacizi ai moleculei de ACTH. Ea își păstrează aceeași structură și secvență a aminoacizilor, indiferent de specie (porc, bou, maimuță, om). Cea de a doua fracție (beta-MSH), dimpotrivă, are 22 de aminoacizi la om și 18 aminoacizi la porc, cal, bou și maimuță. Ambele fracții conțin 7 aminoacizi comuni, dispuși în aceeași ordine ca în molecula de ACTH.

Dozarea lor se face fie biologic pe broasca hipofizectomizată, în funcție de gradul de dispersie a celulelor melanofore, fie radioimunologic.

Acțiunile biologice ale celor două tipuri de MSH sunt, în general, mai puternice la vertebratele inferioare decât la mamifere. La broască, de exemplu, hipofizectomia provoacă albirea pielii, iar administrarea MSH sau a unui extract hipofizar induce reacții inverse, de hiperpigmentare a tegumentelor. Fenomenul de pigmentare se datorește dispersiei granulelor brune (melanozomi) conținătoare de melanină în citoplasmă și apare mai evident la animalul hipofizectomizat sau expus la lumină cu pielea decolorată.

La mamifere, efectele MSH sunt mai slabe și limitate la creșterea conținutului în melanină a melanocitelor. Ele au fost considerate, de altfel, ca un vestigiu evolutiv al proprietăților melanotrope, importante pentru reacțiile cutanate de camuflare și adaptare la mediu a animalelor inferioare.

La baza proprietăților melanocitostimulatoare ale MSH stă creșterea activității tirozin hidroxilazei, care oxidează tirozina transformând-o în dihidroxifenilalanină (DOPA), precursor al melaninei.

În afara creșterii și dispersiei stocului de melanină de la nivelul melanozomilor intracitoplasmatici din piele și mucoase, MSH stimulează steroidogeneza corticosuprarenală. Această acțiune, deși este de 10–20 de ori mai slabă decât a ACTH, constituie o nouă dovadă a similitudinii structurale și funcționale dintre MSH și ACTH.

Reglarea secreției de MSH se realizează predominant pe cale nervoasă, cu participarea unor receptori hipotalamici și a unui factor eliberator specific de natură peptidică. Prin intermediul acestuia

acționează atât stimulii neuro-reflecși sosiți din mediul înconjurător (lumină, temperatură etc.), cât și conținutul în MSH al plasmii sanguine. În lipsa unui organ-țintă secretor, modularea sintezei și eliberării neurohormonului bipotalamic de către MSH hipofizar se produce prin reacții de *feed-back* negativ și pozitiv scurt.

13.1.4. HORMONII RETROHIPOFIZARI

Semnaland efectele hipertensive ale unui extract hipofizar, Oliver și Schäffer (1895) au deschis calea cercetărilor privind hormonii lobului posterior al hipofizei. Principiul activ responsabil de acțiunea presoare a extractului a fost denumit *vasopresină*. Ulterior, Farini (1913) a stabilit că același factor hormonal posedă și proprietăți antidiuretice. Dale (1906), pe de altă parte, a precizat că în extracțiile de hipofiză posterioară se găsește un al doilea factor activ, prevăzut cu efecte oxitocice de stimulare a contracțiilor uterine, căruia i-a dat numele de *oxitocină*.

Cei doi hormoni retrohipofizari au structură chimică asemănătoare, fiind polipeptizi cu 9 aminoacizi în lanț, sintetizați de Du Vigneau și colab. încă din 1953. Locul de formare a vasopresinei și oxitocinei nu este la nivelul țesutului glandular propriu-zis, ca în cazul hormonilor adenohipofizari, ci în nucleii supraoptic și paraventricular din hipotalamusul anterior. De la acești nivel, neurohormonii retrohipofizari se deplasează sub formă de material neurosecretor de-a lungul tractusului bipotalamo-hipofizar, pentru a fi doar depozitați în hipofiza posterioară.

În favoarea unității morfo-funcționale a complexului hipotalamo-retrohipofizar vin următoarele argumente experimentale:

- colorația Gomori specifică neurosecreției hipotalamice apare evidentă nu numai la nivelul nucleilor supraoptic și paraventricular, ci și în fibrele nervoase ale tractusului bipotalamo-hipofizar și terminațiile acestora din jurul capilarelor hipofizei posterioare (corpulculii Herring);
- bipofizectomia provoacă doar o poliurie tranzitorie, întrucât nucleii hipotalamici își continuă activitatea secretorie;
- leziunile distructive ale nucleilor supraoptic și paraventricular sunt, dimpotrivă, urmate de fenomene de diabet insipid definitiv;
- există o sușă de șobolani (Brambleboro) cu diabet insipid ereditar permanent, cauzat de alterări structurale congenitale ale nucleului supraoptic;
- extractele de hipotalamus anterior posedă o activitate antidiuretică evidentă;
- utilizarea cisteinei marcate cu ^{35}S evidențiază sinteza vasopresinei și oxitocinei în hipotalamus;
- secționarea tijei pituitare este urmată de acumularea materialului neurosecretor în segmentul proximal al acesteia. Hipotalamusul anterior conține neuroni secretori specifici pentru cei doi hormoni retrohipofizari. În timp ce nucleul supraoptic este locul de sinteză și secreție a hormonului antidiuretic, nucleul paraventricular sintetizează aproape exclusiv oxitocină.

13.1.4.1. Hormonul antidiuretic

Hormonul antidiuretic (ADH, vasopresină) este un nonapeptid prevăzut cu o punte disulfidică, între aminoacizii 1-6, dispusă sub forma unei bucle, a cărei rupere cu tioglicolat duce la dispariția acțiunilor biologice ale polipeptidului. Compoziția sa chimică nu este identică, ci diferă la unele specii. La mamifere, inclusiv omul, ADH este o arginin-8-vasopresină (vasopresină cu arginina în poziția 8). Excepție fac doar suidele (porcul, hipopotamul) al căror hormon antidiuretic conține lizină în locul argininei (lizin-8-vasopresină).

La celelalte vertebrate (amfibieni, păsări etc.), ADH este arginin-vasotocina. În toate cazurile, ponderea moleculară variază în jurul a 1 000 de daltoni. Cantitatea de ADH prezentă în hipofiza posterioară umană este suficient de mare, variind în jurul a 10 000-15 000 mU. Hormonul apare în cea mai mare parte legat de un suport proteic, denumit neurofizină, în materialul neurosecretor deplasat din bipotalamus în

hipofiză, de care se desface în momentul eliberării. S-au identificat două neurofizine pentru fiecare din cei doi hormoni retrohipofizari, cu greutate moleculară de 10 000.

Dozarea hormonului antidiuretic se poate face fie biologic, urmărind diureza la șobolan sau transportul de apă prin vezica de broască, fie radioimunologic, cu ajutorul unui antiser specific. Din cauza greutății moleculare mici, ADH prezintă însă proprietăți antigenice slabe, făcând dificilă prepararea antiserului.

Pe plan fiziologic, ADH exercită două acțiuni principale. Prima și cea mai importantă are loc la nivelul tubilor renali și privește resorbția apei. ADH intensifică reabsorbția apei din tubii distali și colectori, participând la procesul de concentrare a urinei. Efectul antidiuretic este mai puternic pe fond de încărcare apoasă, decât în condiții de restricție hidrică.

Antidiureza este în general rapidă, dar de scurtă durată. Ea se realizează prin mecanismul creșterii permeabilității tubulare de către cAMP rezultat din activarea adenilat cilazei membranare. ADH crește porozitatea, mai ales a polului apical al celulelor tubulare, impermeabile sau puțin permeabile la apă. Polul bazal fiind permeabil permite stabilirea echilibrului osmotic celular cu mediul intern. În prezența hormonului antidiuretic, crescând și permeabilitatea membranei apicale, apa trece din lumenul tubular spre spațiile interstițiale, a căror osmolaritate apare cu atât mai mare, cu cât interesează o zonă medulară renală mai profundă. Deplasarea apei din lumenul tubilor distali și colectori în plasma peritubulară, favorizată de creșterea permeabilității polului bazal al celulelor epiteliale, se datorește permeabilității polului apical al celulelor epiteliale, difuziunii activate de către ADH, cu participarea adenilat cilazei ca receptor membranar și a cAMP ca mesager biochimic intracelular.

ADH și cAMP au, de altfel, acțiuni comparabile atât asupra transferului de apă prin tubul colector izolat de iepure, cât și asupra antidiurezei la om. La rândul său, intensificarea secreției de hormon antidiuretic produsă de deshidratare se însoțește de creșterea considerabilă a cAMP în rinichi. La realizarea modificărilor enzimato-chimice de permeabilitate membranară participă aquaporinele. (Vezi capitolul 2, Amine biogene.)

La rândul său, ADH posedă proprietăți vasoconstrictoare și hipertensive, cu durată de 10-15 minute după administrarea intravenoasă unică. Cum aceste efecte apar la doze superinare celor antidiuretice, semnificația lor este mai mult farmacologică decât fiziologică.

Dintre acțiunile secundare fac parte facilitarea absorbției intestinale și reducerea perspirației insensibile. La amfibieni, atât ADH, cât mai ales omologul acestuia, arginin-vasotocina, cresc debitul de trecere a apei și ionilor prin piele și vezica urinară, care se comportă similar epiteliului tubular renal al mamiferelor.

Reglarea secreției de ADH este asigurată de osmolaritatea plasmii, care depinde de gradul de hidratare sau deshidratare a organismului. La omul normal hidratat, cu presiunea osmotică a plasmii de 310 mOsm, se găsesc cantități mici, de sub 1 mU pe ml plasmă. Acestea variază în limite largi, în funcție de gradul de stimulare a osmoreceptorilor Verney din imediata vecinătate a nucleului supraoptic din hipotalamusul anterior.

Hidropenia, determinând deshidratare și biperosmoză, provoacă excitarea osmoreceptorilor hipotalamici și eliberare de ADH, urmată de efecte antidiuretice compensatoare, în vederea reținerii apei și restabilirii echilibrului hidric. Creșterea presiunii osmotice doar cu câțiva miliosmoli este suficientă pentru a produce antidiureză în mai puțin de 1 minut. Hipoosmoza provoacă efecte inverse, de inhibare a secreției de ADH.

Răspunsul antidiuretic presupune integritatea complexului hipotalamo-hipofizar. În timp ce stimularea directă a retrohipofizei nu provoacă antidiureză, injectarea în hipotalamusul anterior a unei soluții hipertone de NaCl determină descărcări electrice în nucleul supraoptic și eliberare de ADH. Distrugerea hipotalamusului, din contră, suprimă secreția de ADH, ducând la instalarea diabetului insipid.

Prin modificările echilibrului hidric, ADH participă la reglarea volumului sanguin. Creșterea volumului plasmatic, de exemplu, ca și hipoosmoza reduc secreția de ADH, favorizând diureza. Efectul inhibitor al hipovolemiei se realizează cu participarea voloreceptorilor din auriculă stângă, a căror distensie deprimă eliberarea de ADH. Contrar hipovolemiei, scăderea volumului sanguin în hemoragie crește secreția de ADH, pentru a reduce la minimum pierderile de apă pe cale renală.

Activitatea secretorie a complexului supraoptico-retrohipofizar se găsește atât sub controlul umoral al osmolarității mediului intern, cât și sub influența stimulilor nespecifici de tipul durerii, emoțiilor, luminii, efortului, suptului etc. Aceștia intensifică eliberarea de ADH pe cale neuro-reflexă. Temperaturile joase și alcoolul exercită efecte inverse de tip inhibitor, inducând poliurie.

13.1.4.2. Oxitocina

Oxitocina, deși are structură nonapeptidică foarte apropiată de a hormonului antidiuretic, posedă proprietăți biologice diferite. Singura densitate structurală între cei doi hormoni retrohipofizari este prezența în cazul oxitocinei a leucinei în locul argininei în poziția 8 și a izoleucinei în locul fenilalaninei în poziția 3. Formată în nucleul paraventricular din hipotalamusul anterior, oxitocina se găsește depozitată, ca și ADH, în retrohipofiză sub formă liberă sau cuplată cu o neurofizină specifică în materialul neurosecretor.

Contrar vasopresinei, efectele oxitocinei se exercită asupra uterului și glandei mamare, acțiunea antidiuretică fiind neglijabilă.

Stimularea musculaturii uterine apare evidentă atât *in vivo*, cât și *in vitro* și variază în funcție de specie și starea funcțională a mușchiului. Slab în afara gestației, răspunsul contractil crește progresiv în timpul sarcinii, devenind maxim la termen, datorită impregnării cu estrogeni și mai ales progesteron. Modificând potențialul de membrană al fibrei uterine, oxitocina mărește sensibilitatea uterului gravid la stimulii intrinseci. Ca urmare a creșterii excitabilității, automatismul mușchiului uterin și propagarea unde de excitație apar stimulate.

Cea de a doua acțiune principală a oxitocinei are loc la nivelul glandei mamare și constă în declanșarea secreției lactate. Contractând elementele mio-epiteliale ale canalelor galactofore, preparate în prealabil de hormonii ovarieni și prolactină, oxitocina stimulează ejecția de lapte, sinergismul cu prolactina fiind indispensabil lactației normale.

Pentru ca glanda mamară să asigure secreția lactată normală în perioada de alăptare, este necesar să se dezvolte corespunzător în timpul sarcinii sub influența hormonilor estrogeni și progestativi, iar ulterior hipofiza să debiteze cantități suficiente de prolactină și oxitocină, în vederea întreținerii activității sale secretorii la un nivel suficient de ridicat.

În timpul sarcinii, oxitocina având perioadă de înjumătățire scurtă (3 minute), este inactivată rapid de o oxitocinază plasmatică. Odată cu ajungerea sarcinii la termen, activitatea oxitocinazei se prăbușește, permițând oxitocinei să acționeze maximal asupra mușchiului uterin gravid.

Stimularea secreției de oxitocină se realizează pe cale predominant neuro-reflexă. Excitantul fiziologic este reprezentat de aferențele senzoriale plecate fie de la nivelul tractului genital în timpul travaliului, fie din zona mamelonară în perioada de alăptare (fig. 13.12).

Sucțiunea și evacuarea canalelor galactofore apar strict necesare declanșării și întreținerii secreției de oxitocină prin nucleul paraventricular, a cărei activitate electrică crește în timpul alăptării. Leziunile hipotalamice sau ale tijei pituitare deprimă atât travaliul, cât și ejecția de lapte. Administrarea de oxitocină în astfel de cazuri restabilește ambele funcții. Tipatul nou-născutului, mirosul și simpla vedere a acestuia favorizează, de asemenea, secreția lactată. Reglarea reflexă rămâne însă mecanismul de bază al adaptării secreției de oxitocină la necesitățile expulziei fătului din cavitatea uterină și alăptării sale în primele luni de viață extrauterină. Întreruperea actului de sucțiune duce în scurt timp la dispariția secreției lactate, ca urmare a deficitului secretor de prolactină și oxitocină.

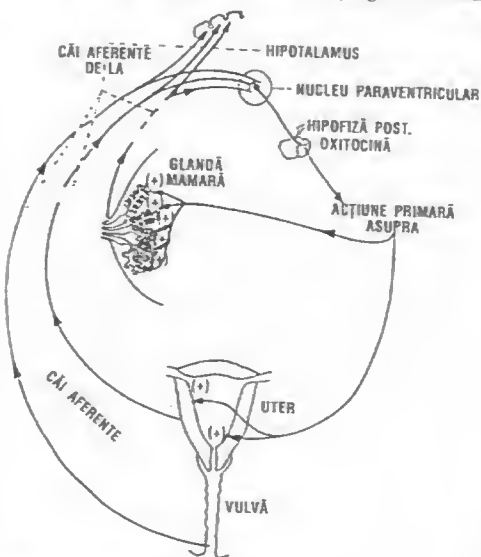


Fig. 13.12. Reglarea neuro-reflexă a secreției de oxitocină.

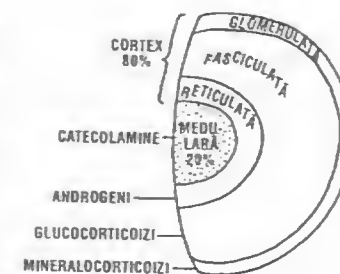
În afara sarcinii, oxitocina participă prin receptorii de la nivelul ovarelor și mucoasei uterine la realizarea ciclului menstrual utero-ovarian.

Și la bărbați, oxitocina influențează activitatea reproductivă. Conținutul plasmei în oxitocină crește semnificativ în timpul actului sexual la ambele sexe. Creșterile ating valori maxime în timpul ejaculării. Bărbații au receptori specifici la nivelul testiculelor, epididimului și prostatei, a căror stimulare de către oxitocină intensifică troficitatea și mobilitatea tubilor seminiferi, favorizând steroidogeneza și formarea spermei și deplasarea acesteia în timpul ejaculării.

13.2. SUPRARENALELE

Situate la polul superior al rinichililor, suprarenalele, în greutate de 4-6 g, sunt glande endocrine formate din două părți distincte din punct de vedere embriologic și funcțional. În timp ce teritoriul glandular extern, corticosuprarenala, de origine mezodermică, participă prin hormonii steroizi la menținerea echilibrului hidroelectrolitic și energetic, componenta ectodermică internă, medulosuprarenala, este de fapt un ganglion simpatic mai dezvoltat, în care neuronii postganglionari și-au pierdut terminațiile axonale, transformându-se în celule cromafine secretoare. Stimularea acestora pe calea fibrelor preganglionare simpatice ale nervilor splanhnici determină secreție predominantă de adrenalină, alături de noradrenalină, ca principalii mesageri chimici ai impulsurilor simpatico-adrenergice. Cele două teritorii endocrine sunt inegal reprezentate, corticosuprarenala deținând aproximativ 80% din greutatea glandelor suprarenale, în timp ce medulosuprarenalei îi revin doar 15-20% din greutatea glandei. La rândul său, corticosuprarenala este constituită din trei zone cu structură și metabolism diferențiat, în vederea sintezei de hormoni steroizi specifici. În timp ce zona glomerulată externă, subcapsulară, secretă hormoni mineralocorticoizi, zona fasciculată medie este secretoare de hormoni glucocorticoizi; zona reticulată situată profund secretă hormoni sexoizi (androgeni) (fig. 13.13).

Fig. 13.13. Zonele secretoare de hormoni corticosuprarenali.



Extirparea acestora provoacă moarte în câteva zile, ca urmare a dezechilibrelor energetice și hidroelectrolitice determinate de suprimarea secreției lor hormonale. Contrar corticosuprarenalei, care este indispensabilă proceselor vitale, medulosuprarenala poate fi distrusă fără consecințe importante asupra funcțiilor somato-vegetative bazale. În schimb, reacțiile de adaptare neuro-endocrino-metabolice sunt profund alterate, determinând scăderea rezistenței organismului la efort, boală și alte suprasolicitări.

Asocierea topografică a porțiunii corticale a glandelor suprarenale cu cea medulară, considerată mult timp întâmplătoare, are la bază sinergismul biologic dintre hormonii glucocorticoizi secretați de zona fasciculată a corticosuprarenalelor și cei eliberați de medulosuprarenale. Primii stimulează biosinteza adrenalinei (Wurtman și Axelrod, 1966), prin mecanismul activării enzimei metilante a noradrenalinei (feniletanolamin N-metiltransferaza), iar adrenalina, ca principal hormon medulosuprarenal, intensifică activitatea secretorie a complexului hipotalamo-hipofizar eliberator de adrenocorticotrofină (ACTH), stimulator, la rândul său, a secreției de hormoni corticosuprarenali: prin efectele lor hiperglicemiante aceștia participă la creșterea glucozei din sânge și la asigurarea substratului energetic necesar reacțiilor de apărare și adaptare ale organismului la diversele solicitări normale și patologice.

13.2.1. HORMONII CORTICOSUPRARENALI

Ca produși de secreție endocrină ai țesutului glandular corticosuprarenal, hormonii corticosteroizi au fost descoperiți târziu, de abia după ce Hartmann (1930) a semnalat că extractele totale de corticosuprarenală de tipul cortinei asigură supraviețuirea animalelor suprarenalectomizate ca urmare a îndepărtării dezechilibrelor metabolice (hipoglicemie, hiponatremie, hiperpotasemie, creșterea eliminării urinare a apei și sodiului) și funcționale (hipotensiune, astenie, hipotermie, scăderea rezistenței la stres etc.) create de extirparea suprarenalelor.

În perioada 1934–1943, Kendall, Reichstein și colab. au izolat corticosteronul, cortizonul și cortizolul, iar în 1953, Tait și Simpson au identificat electrocortina sau aldosteronul. În prezent se recunosc peste 30 de compuși izolați din cortexul suprarenal, din care numai doi sunt de importanță primordială pentru funcția endocrină a glandelor corticosuprenale. Aceștia sunt cortizolul, ca principal hormon glucocorticoid, și aldosteronul, ca mineralocorticoid.

13.2.1.1. Biosinteza și metabolizarea hormonilor corticosuprenali

Toți hormonii corticosuprenali sunt compuși sterolici formați din colesterolul circulant absorbit de celulele glandulare prin endocitoză. Mici cantități se sintetizează local din acetil coenzima A. Din nucleul comun ciclopentano-perhidrofenantronic al colesterolului se formează, cu ajutorul unui echipament enzimatic diferențiat, nucleei specifici celor trei categorii de hormoni corticosuprenali.

Sinteza glucocorticoizilor are loc în zona fasciculată și, într-o mică măsură, și în cea reticulată. Secvența reacțiilor este următoarea:



Localizarea intracelulară a reacțiilor implicate în biosinteza cortizolului este atât mitocondrială, cât și în reticulul endoplasmatic. Hidroxilarea în mitocondrii a 11-dezoxicortizolului prezintă caracter critic și limitant.

La rândul său, sinteza aldosteronului, principalul mineralocorticoid, se realizează exclusiv în zona glomerulată. Ea parcurge aceleași etape ca în zona fasciculată, până la stadiul de progesteron. Prin hidroxilarea succesivă a progesteronului la carbonul din pozițiile 21, 11 și 18 se obține dezoxicorticosteronul, corticosteronul și 18-hidroxicorticosteronul. Enzima 18-hidroxilaza găsimu-se numai în zona glomerulată, oxidarea hidroxilului din C_{18} al hidroxicorticosteronului și formarea unei grupări aldehide în poziția respectivă duc la sinteza aldosteronului. Legarea atomului de oxigen și prezența aldehidei în poziția C_{11} reprezintă condiții obligatorii ale apariției efectelor mineralocorticoide ale aldosteronului. Precursorii acestuia sunt mai puțini activi.

Formulele chimice ale celor doi principali hormoni corticoizi sunt următoarele (fig. 13.14).

De remarcat prezența grupării cetonice în poziția 3 și hidroxilarea la C_{11} și C_{21} , în cazul cortizolului, precum și legarea oxigenului cu formarea grupării aldehide la C_{11} în cazul aldosteronului.

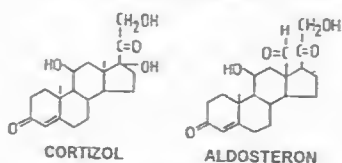


Fig. 13.14 Structura chimică a cortizolului și a aldosteronului.

Sinteza hormonilor sexoizi în zona reticulată se realizează, de asemenea, prin procese de transformare succesivă a colesterolului în pregnenolon și progesteron. Cu ajutorul unei desmolaze mitocondriale, aceștia sunt transformați în 17-cetosteroizi de tipul dehidroepiandrosteronului liber (DHEA) și sulfat (DHEA-S) sau al androstendionului și eliminați aproape integral pe cale urinară. Două treimi din 17-cetosteroizii urinari sunt de origine corticosuprarenală (5–10 mg/zi). Mici cantități sunt convertite în testosteron sau estradiol de către țesuturile periferice, mai ales după încetarea activității secreției gonadale.

Principalii hormoni glucocorticoizi sunt cortizolul sau hidro cortizonul, corticosteronul, cortizonul, prednisonul, metilprednisonul și dexametazonul. Dintre aceștia, numai cortizolul și corticosteronul sunt naturali, primul asigurând aproximativ 95% din activitatea hormonilor glucocorticoizi circulanți. Restul glucocorticoizilor sunt produși de sinteză, prevăzuți cu acțiuni egale sau mai puternice decât ale cortizolului. Astfel, prednisonul este de 4–5 ori mai activ decât cortizolul, iar dexametazonul de 30 de ori.

La rândul lor, mineralocorticoizii sunt reprezentați nu numai de aldosteron, ci și de precursorii acestuia, corticosteronul și dezoxicorticosteronul. În timp ce aldosteronul acoperă 95% din activitatea mineralocorticoidă, ceilalți doi derivați sterolici sunt mult mai puțin activi.

Cortizolul și cortizonul posedă, de asemenea, o slabă activitate mineralocorticoidă. Dintre glucocorticoizi, doar dexametazonul este lipsit de proprietăți mineralocorticoide. Derivatul sintetic 9 alfa-fluorocortizol este, din contră, tot așa de activ ca aldosteronul. După Best și Taylor (1985), producția zilnică și concentrația plasmatică a principalilor hormoni corticosuprenali este următoarea (tabelul 13.1).

TABELUL 13.1

Biosinteza și concentrația hormonilor corticosuprenali

Hormoni	Biosinteză în mg/zi	Concentrație în ng/ml
Glucocorticoizi		
Cortizol	8–25	40–180
Corticosteron	1–4	2–14
Mineralocorticoizi		
Aldosteron	0,05–0,15	0,15
Dezoxicorticosteron	0,6	0,15
Sexoizi		
DHEA	7–15	5
DHEA-S	—	1 200
Androstendion	2–5	1,8

Concentrațiile variază cu vârsta, sexul și ritmul diurn, fiind mai mari dimineața decât seara. Dacă secreția zilnică medie a cortizolului este în jur de 15 mg, cea a aldosteronului atinge doar 150 μg.

Cortizolul circulant este legat în proporție de până la 90% de o globulină plasmatică sintetizată în ficat și denumită transcortină, cu greutatea moleculară de 52 000 de daltoni. Concentrația normală a acesteia este de 3 mg%. Ea posedă o capacitate de legare a cortizolului de 20 μg%. Aceasta crește în timpul sarcinii sau al administrării de estrogeni.

Forma legată fiind inactivă, numai fracția liberă, care nu depășește 10% din concentrația cortizolului plasmatic, exercită efecte fizio-farmacologice. Aldosteronul, combinându-se mai slab cu proteinele plasmatică transportoare, circulă sub formă liberă în proporție de aproximativ 50%. Datorită acestui fapt, perioada de înjumătățire a aldosteronului circulant este de 15 minute, în timp ce cea a cortizolului variază în jurul a 90 de minute.

Inactivarea hormonilor corticosuprenali se realizează în ficat, transformându-se în tetrahidroderivați ai acestora, care, prin conjugare cu acizii glucuronic și sulfuric, formează glucuronizi și sulfati, excretați în proporție de 75% în urină și restul de 25% prin bilă, în materiile fecale. Dintre produșii de metabolizare ai cortizolului, determinarea 17-hidroxicorticosteroidilor prezintă interes clinic deosebit, întrucât reflectă excesul sau deficitul secretor de glucocorticoizi. Catabolizarea hormonilor sexoizi în 17-cetosteroizi a fost deja menționată. Reprezentând 2/3 din conținutul în 17-cetosteroizi al urinei, determinarea lor oferă indicații asupra activității secreției a glandelor suprarenale.

Cele două categorii principale de hormoni corticosuprenali având proprietăți și funcții diferite, efectele și reglarea secreției lor vor fi prezentate separat.

13.2.1.2. Hormonii glucocorticoizi

Efectele hormonilor glucocorticoizi pot fi împărțite în primare și secundare. Din prima categorie fac parte acțiunile asupra marilor metabolisme.

Cortizolul, ca principal hormon glucocorticoid, afectează în principal metabolismul hidrocarbonat, crescând conținutul în glucoză al sângelui prin mecanismul stimulării procesului de gluconeogenază.

Stimularea gluconeogenezei hepatice de către hormonii glucocorticoizi se realizează pe două căi. Mai întâi, complexul hormon-receptor activează transcripția ADN din nucleul celulelor hepatice și formarea de ARN-mesager care, la rândul său, realizează translația mesajului la ribozomi în vederea intensificării sintezei de proteine necesare conversiei aminoacizilor în glucoză. În al doilea rând, cortizolul și ceilalți glucocorticoizi determină mobilizarea aminoacizilor din țesuturile extrahepatice și mai ales din mușchi.

Accelerarea degradării proteinelor tisulare și creșterea conținutului în aminoacizi al plasmelor sunt dublate de inhibarea sintezei proteice și de intensificarea reacțiilor de gluconeogenază hepatică. Ca rezultat, crește conținutul în glucoză al plasmelor și în glicogen al ficatului. Dintre enzimele care participă la conversia aminoacizilor în glucoză și glicogen, activată de glucocorticoizi, fac parte alanin transaminaza, tirozin transaminaza, triptofan pirrolaza serică și treonin dehidraza, piruvat carboxilaza, fosfoenolpiruvat carboxilaza, aldolaza, glicogen sintetaza etc. Paralel cu activarea gluconeogenezei, cortizolul inhibă efectele stimulatoare ale insulinei asupra captării glucozei de către țesutul adipos și cel muscular. Un efect de inhibare a consumului de glucoză a fost dovedit la nivel celular, ca urmare a deprimării reacției de oxidare a NADH necesar glicolizei.

Din acțiunea conjugată a glucocorticoizilor de intensificare a gluconeogenezei hepatice și de reducere a utilizării celulare a glucozei rezultă creșterea concentrației acesteia în sânge, realizând așa-zisul diabet adrenal. Spre deosebire de diabetul pancreatic, acesta prezintă o sensibilitate moderată la insulină. Concomitent cu efectele asupra metabolismului glucidic, hormonii glucocorticoizi influențează substanțial metabolismul proteic. Ei reduc conținutul în proteine al tuturor organelor, cu excepția ficatului. Acest efect se datorează catabolismului celular crescut și inhibării sintezei proteice extrahepatice.

Modificarea crescută a aminoacizilor din proteinele tisulare, dublată de deprimarea transportului și utilizării lor la procesele de refacere a stocului celular proteic, duce la creșterea aminoacizilor din sânge și la conversia acestora în glucoză la nivel hepatic, cu ajutorul enzimelor implicate în gluconeogenază.

De o manieră asemănătoare, glucocorticoizii afectează metabolismul lipidic. Cortizolul, de exemplu, intensifică lipoliza și potențează efectele altor factori lipolitici, cum este cazul catecolaminelor circulante, favorizând mobilizarea acizilor grași din țesutul adipos. Totodată, cortizolul crește oxidarea celulară a acizilor grași în scop energetic, realizând o reducere importantă a consumului de glucoză. Datorită consumului exagerat de lipide, cortizolul exercită efecte cetonice, mai ales în condițiile deficitului de insulină. La rândul său, glicerolul eliberat din țesutul adipos este folosit ca substrat în gluconeogenază.

Efectele lipolitice ale cortizolului pot fi contracarate de cele lipogenetice, ca urmare a stimulării apetitului și ingestiei crescute de alimente. Obezitatea rezultată se particularizează prin depunerea grăsimii în regiunea toracică și a capului.

Datorită efectelor metabolice menționate, hormonii glucocorticoizi afectează structura și funcțiile multor țesuturi și organe. Dintre acestea fac parte musculatura scheletică, vasele, țesutul conjunctiv, sistemul imunitar, sistemul vascular, sistemul nervos etc.

La nivelul mușchilor, cortizolul exercită o acțiune dublă. Deficitul sau absența sa deprimă contractilitatea, lucrul mecanic și rezistența la efort. Excesul de cortizol crescând, catabolizarea proteinelor din mușchi provoacă reducerea masei musculare și astenie, însoțite de inhibarea sintezei de collagen și țesut osos. Totodată, cortizolul reduce absorbția de calciu din intestin și crește eliminarea urinară a acestuia, diminuând calcemia, mineralizarea și rezistența osoasă. La rândul său, sistemul vascular este sensibilizat la acțiunea constrictoare a catecolaminelor. Prin acest mecanism, dublat de scăderea permeabilității capilare, cortizolul participă la mărirea volumului și presiunii sanguine. Numărul hematiilor crește, iar migrarea leucocitară la locul agresiunilor tisulare scade sub influența glucocorticoizilor. În plus, ei stabilizează lizozomii, reducând eliberarea de enzime proteolitice și hialuronidază. În modul acesta, cortizolul previne apariția sau împiedică extinderea reacției inflamatoare. În plus, acesta cauzează rapidă rezoluție a inflamației și accelerează vindecarea. Efectele antiinflamatoare se manifestă și în cazul reacțiilor alergice, deși nu influențează reacția antigen-anticorp. Combătând răspunsul inflamator din timpul reacțiilor alergice, cortizolul previne șocul sau moartea în anafilaxie. Dozele mari scad cozinofilele și limfocitele din sânge și totodată produc atrofia timusului și a țesutului limfoid din întregul organism. Ca urmare, lansarea în circulație a celulelor T și anticorpilor este deprimată, iar apărarea imunitară prăbușită. Prin acest mecanism se poate

ajunge la infecții fulminante, adeseori letale. Suprimarea reacțiilor de apărare imunitară de către glucocorticoizi și-a găsit însă utilitatea în prevenirea rejektului imunologic al organelor transplantate.

Printr-un mecanism insuficient cunoscut, cortizolul modulează activitatea senzorială și emoțională a creierului. Acest efect se realizează prin intermediul unor receptori specifici, prezenți mai ales în sistemul limbic. El participă la fenomenele de activare cortico-subcorticală din timpul diverselor forme de stres. După cum se știe, o gamă variată de stimuli nespecifici cresc debitul secretor al corticosuprarenalelor, începând cu traumele de orice fel, infecțiile, variațiile de temperatură sau imobilizarea forțată și sfârșind cu efortul fizic și intervențiile chirurgicale. Secreția predominantă de cortizol determină, în aceste situații, mobilizarea aminoacizilor și grăsimilor labile din celule, în vederea utilizării lor atât ca substrat energetic, cât și la sinteza unor cantități de glucoză și alte substanțe utile refacerii celulare și menținerii vieții.

Reglarea secreției de glucocorticoizi. Concentrația plasmatică a hormonilor glucocorticoizi se menține în limite constante printr-un mecanism de autoreglare și control asigurat aproape integral de ACTH adenohipofizar. Acesta crește cu 10-15% producția de androgeni suprarenali și, într-o măsură mult mai mică, pe aceea de hormoni mineralocorticoizi.

Din structura polipeptidică a ACTH, primii 24 de aminoacizi dețin întreaga activitate stimulatoră a secreției de hormoni glucocorticoizi. La rândul său, ACTH hipofizar este sub controlul umoral al CRF hipotalamic. El este un polipeptid format din 41 de aminoacizi, secretat de zona hipofizotropă hipotalamică, respectiv de eminența mediană. În sistemul port hipofizar și transportat pe cale sanguină în hipofiza anterioară, în vederea stimulării secreției de ACTH. În absența CRF, hipofiza anterioară secretă doar mici cantități de ACTH, eliberate sub influența vasopresinei retrohipofizare. Ajuns pe calea circulației generale la nivelul teritoriului glandular suprarenal, ACTH activează adenilat ciclaza membranară, inducând formarea rapidă de cAMP. Acesta activează enzimele implicate în sinteza hormonilor suprarenali și îndeosebi desmolaza necesară conversiei inițiale a colesterolului în pregnenolon. Activând prima treaptă a biosintezei hormonilor corticosuprarenali, ACTH este astfel necesar pentru toate cele trei categorii de sinteze hormonale. Stimularea de lungă durată a cortexului adrenal de către ACTH determină hipertrofia și proliferarea celulelor secretoare din zonele fasciculată și reticulată. În felul acesta, ACTH stimulează atât creșterea țesutului glandular corticosuprarenal, cât și secrețiile hormonale ale acestuia.

Diferitele forme de stres fizic, chimic, biologic sau mental provoacă creșterea rapidă (în câteva minute) a secreției de ACTH și cortizol, ca urmare a stimulării axului hipotalamo-hipofizo-suprarenal. Hipersecreția indusă de diverși factori stresanți dispare după distrugerea prin electrocoagulare a eminenței mediane. Prin acțiunile metabolice multiple, cortizolul circulant exercită efecte *feed-back* negative directe atât asupra hipotalamusului, pentru a inhiba formarea de CRF, cât și asupra hipofizei anterioare, în vederea frânării secreției de ACTH (fig. 13.15). În afara *feed-back*-ului lung realizat de cortizol asupra complexului hipotalamo-hipofizar, există și un *feed-back* scurt între ACTH și CRF. Prin astfel de relații de *feed-back* negativ sau pozitiv se asigură autoreglarea concentrației cortizolului plasmatic. Ori de câte ori concentrația acestuia este prea mare, *feed-back*-ul reduce automat secreția de ACTH și cortizol. Când cortizolul din plasmă este scăzut, lipsa *feed-back*-ului negativ permite creșterea acestuia și revenirea la normal.

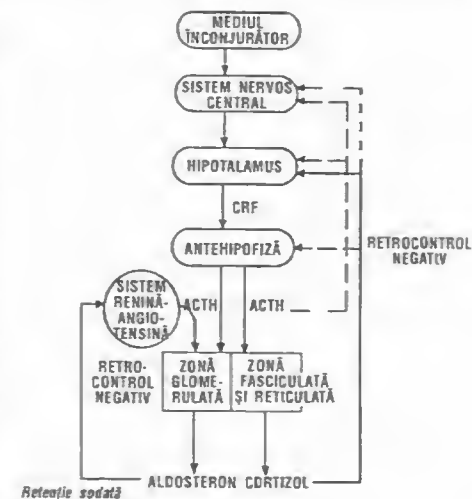


Fig. 13.15. Autoreglarea secreției corticosuprarenale.

13.2.1.3. Hormonii mineralocorticoizi

Principala acțiune a hormonilor mineralocorticoizi se exercită asupra metabolismului hidroelectrolitic. Lipsa acestora determină creșterea potasiului și scăderea sodiului plasmatic, însoțite de reducerea volumului sanguin și a lichidelor extracelulare, producătoare de șoc și exitus. Moartea survine între câteva zile și două săptămâni, dacă nu se practică terapia de substituție cu NaCl sau hormoni mineralocorticoizi. Fiind indispensabili funcțiilor vitale, mineralocorticoizii sunt considerați „protectori ai vieții” (*life saving*).

Aldosteronul asigură cel puțin 95% din acțiunile mineralocorticoizilor. Efecte mult mai slabe produc corticosteronul, deoxicorticosteronul și chiar cortizolul.

Potențialul mineralocorticoid și glucocorticoid al principalilor hormoni corticoizi este prezentat în tabelul 13.11.

TABELUL 13.11

Potențialul comparativ al corticoizilor		
Hormoni	Activitate mineralocorticoidă	Activitate glucocorticoidă
Cortizol	1	1
Corticosteron	2	0,2
Deoxicorticosteron	20	0,01
Aldosteron	400	0,1
Cortizon	0,7	0,7
Fluorocortizon	400	10

De departe, aldosteronul și derivatul sintetic al cortizonului – fluorocortizonul – apar ca cei mai activi mineralocorticoizi. Acțiunea lor se exercită la nivelul tubilor uriniferi și constă în intensificarea absorbției de sodiu, dublată de excreția potasiului prin celulele epitelului tubular distal și colector. Favorizând resorbția sodiului, aldosteronul intervine pentru ca acesta să fie conservat în lichidele extracelulare, în timp ce potasiul este excretat în urină. Creșterea concentrației sale în plasmă se însoțește de reducerea considerabilă a eliminărilor minime ale sodiului, dublată de pierderi mari de potasiu. Din contră, lipsa aldosteronului duce la eliminări urinare de până la 20 g de sodiu/zi, ceea ce corespunde la 1/5 din cantitatea totală a organismului. Concomitent cu intensificarea resorbției tubulare a ionilor de sodiu, aldosteronul determină reabsorbția unei cantități echivalente de apă. Aceasta „urmează” ionii de sodiu, datorită hidrofiliilor lor și gradientului osmotic creat între tubii uriniferi și lichidele peritubulare. După o perioadă de activitate resorbtivă maximă, de 3–4 zile, apare fenomenul „de scăpare” a aldosteronului, caracterizat prin pierderea de sodiu și apă pe cale urinară. Acesta se datorește creșterii presiunii arteriale ca urmare a hipervolemiei rezultate din activarea resorbției tubulare de sodiu și apă. Hipertensiunea arterială este, de altfel, una din consecințele frecvente ale hipersecreției de aldosteron. Pe de altă parte, pierderea excesivă de potasiu prin urină determinată de aldosteron produce hipokaliemie, alterarea proprietăților electrice ale nervilor și mușchilor și astenie musculară. La rândul său, insuficiența secreției de aldosteron se soldează cu creșterea potasiului plasmatic și cu consecințe cardiotoxice de diferite grade (aritmie, hipotonie, stop cardiac). Paralel cu reținerea sodiului și eliminarea potasiului, aldosteronul activează secreția tubulară de hidrogen-ioni în schimbul ionilor de sodiu, predispunând la alcaloză. Efecte similare se produc la nivelul glandelor sudorale, salivare și intestinale, în vederea resorbției și conservării clorurii de sodiu în lichidele extracelulare.

Mecanismul celular de acțiune al mineralocorticoizilor este următorul: fiind solubil în lipide, aldosteronul difuzează ușor prin membrana celulară în citoplasma celulelor epiteliale tubulare renale, salivare, intestinale etc., pentru a se combina cu un receptor proteic în vederea deplasării spre nucleu. La nivel nuclear, aldosteronul acționează asupra ADN, activând formarea de ARN-mesager și protein enzimice citoplasmice de tipul ATPazei. Aceasta catalizează transferul de energie de la ATP citoplasmatic la mecanismul de transport membranar, asigurând intensificarea resorbției de sodiu, pe de o parte, și eliminării de potasiu și ioni de hidrogen, pe de altă parte.

Efectul activator atinge nivelul maxim după câteva ore, întrucât necesită un timp de formare a substanțelor intracelulare implicate în transportul activ al sodiului și potasiului.

Reglarea secreției de aldosteron. Principala funcție a mineralocorticoizilor fiind asigurarea volumului lichidelor extracelulare prin conservarea sodiului în organism, secreția acestora este controlată și autoreglată de semnalele produse la nivel renal de modificarea echilibrului electrolic și volumului sanguin circulant. Aldosteronul, ca principal mineralocorticoid, este reglat de concentrațiile sodiului și potasiului din plasmă și celelalte lichide extracelulare, precum și de sistemul renină-angiotensină. Depleția sodată de diferite cauze (alimentară, renală, sudorală etc.), reducând lichidele extracelulare și volumul sanguin, determină scăderea presiunii și fluxului arterial renal, urmate de activarea sistemului renină-angiotensină-aldosteron. Atât deficitul de sodiu, cât și excesul de potasiu plasmatic stimulează zona glomerulată secretoare de aldosteron în vederea restabilirii echilibrului electrolic cu ajutorul acestuia.

În timp ce hiponatremia stimulează secreția de aldosteron, hipernatremia o inhibă (vezi fig. 11.38).

Fenomene inverse de *feed-back* pozitiv și negativ au loc în cazul variațiilor ionului de potasiu din plasmă. Hiperkaliemia activează eliberarea aldosteronului pentru ca, prin efectele sale kaliuretice, să îndepărteze surplusul de potasiu din sânge, iar hipokaliemia inhibă secreția de aldosteron pentru a reduce eliminările urinare ale potasiului.

Pe de altă parte, ischemia renală intensifică secreția de renină de la nivelul arteriolelor aferente preglomerulare și formarea de angiotensină stimulatorie, la rândul său, a secreției de aldosteron (fig. 13.16). Efecte contrare de inhibare a secreției de aldosteron produc excesul de sodiu din plasmă și hipervolemia, ca urmare a deprimării sistemului renină-angiotensină.

Prin același mecanism indirect al renineliberării crescute, ortostatismul, hemoragiile sau diureza acută realizează creșterea secreției de aldosteron. Fenomenele de predominanță simpatică activează, de asemenea, secreția de renină prin intermediul receptorilor beta-adrenergici și formarea de angiotensină aldosteronoeliberatoare. Blocantele beta-adrenergice deprimă nu numai secreția de renină, ci și pe cea de aldosteron. Un efect permisiv asupra secreției de aldosteron exercită și ACTH hipofizar. Prezența sa în cantități mici este indispensabilă inițierii biosintezei acestuia și creșterii eficienței factorilor reglatori menționați. În absența ACTH se produce o atrofiere parțială a zonei glomerulate și totală a zonelor fasciculată și reticulată. Participarea posibilă a adrenoglomerulotrofinei de origine diencefalică sau epifizară la reglarea secreției de aldosteron, presupusă de Farel (1959), nu a fost confirmată. După unii autori citați de Guyton (1986), beta-lipotrofina hipofizară ar stimula secreția de aldosteron.

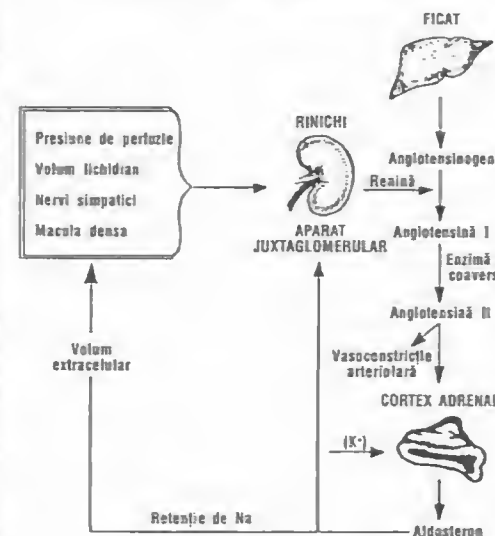


Fig. 13.16. Factorii de autoreglare a secreției de aldosteron.

13.2.1.4. Hormonii sexoizi

Efectele acestor hormoni de origine suprarenală sunt mai evidente în cursul vieții fetale. Dehidroepiandrosteronul, mai ales, contribuie la dezvoltarea organelor sexuale masculine în timpul vieții intrauterine și al copilăriei. După pubertate, atât androstendionul, cât și dehidroepiandrosteronul se transformă în testosteron, potențând efectele masculinizante ale hormonilor testiculari. La femeie, hormonii

androgeni asigură dezvoltarea și menținerea pilozității pubiene și axilare tot timpul vieții. Secreția de estrogeni la bărbat este neînsemnată în condiții normale. De altfel, ambele categorii de hormoni sexoizi sunt implicate mai mult în disfuncțiile corticosuprenale de tipul sindromului adrenogenital, decât în reglările normale, fiziologice.

13.2.2. HORMONII MEDULOSUPRARENALI

Glanda medulosuprarenală, ca parte componentă atât a sistemului endocrin, cât și a sistemului nervos simpatico-adrenergic, deține un loc aparte în reglările neuro-endocrine. Celulele conținătoare de granule cromafine ale țesutului glandular medulosuprarenal posedă capacitatea de a sintetiza și elibera în sângele circulant trei neurohormoni: adrenalina, noradrenalina și dopamina, denumiți generic catecolamine, datorită nucleului catecolic (nucleu fenolic dihidroxilat) comun al acestora. Dintre cele trei catecolamine circulante, noradrenalina este secretată în mod predominant de terminațiile neuronale simpatică, dopamina are origine mixtă atât nervoasă, cât și glandulară, iar adrenalina este de proveniență exclusiv medulosuprarenală. Țesutul cromafin medular este singurul teritoriu simpatic care conține enzima metilantă a noradrenalinei, indispensabilă formării de adrenalina. Aproximativ 80% din conținutul granulelor cromafine este reprezentat de adrenalina și 15–20% de către noradrenalina. În afara acestora, glandele medulosuprenale conțin ATP și alte nucleotide, peptide opioide de tipul Met-enkefalinei și Leu-enkefalinei, serotonina și alte substanțe biologice active.

13.2.2.1. Biosinteza, acțiunile și metabolizarea hormonilor medulosuprenali

Biosinteza catecolaminelor medulosuprenale se realizează în trepte succesive din aminoacidul tirozină cu ajutorul unor enzime specifice. Etapele biosintezei propuse de Blaschko (1939) au fost confirmate de numeroși autori (vezi Biosinteza catecolaminelor de la capitolul Transmiterea sinaptică. Mediația adrenergică).

Prima reacție catalizată de enzima tirozin hidroxilaza asigură conversia tirozinei în dihidroxifenilalanină (DOPA) și are caracter limitant asupra producției de catecolamine. Ea necesită oxigen, o tetrahidropteridină și NADPH, noradrenalina inhibând-o prin *feed-back* negativ. Alfa-metiltirozina blochează de asemenea activitatea tirozin hidroxilazei, reducând sinteza de catecolamine cu 60–80%.

A doua treaptă este reprezentată de transformarea DOPA în dopamină cu ajutorul unei decarboxilaze citoplasmice nespecifice, care utilizează piridoxal fosfatul drept cofactor.

Sub influența DOPA decarboxilazei se realizează transformarea DOPA în dopamină, care este preluată apoi de granulele cromafine în vederea formării de noradrenalina. Această a treia etapă necesită participarea dopamin beta-hidroxilazei în prezența unei molecule de oxigen și a unui donator de hidrogen. În aproximativ 15–20% din granule, reacțiile de biosinteză se opresc aici. În 80–85% din granule are loc difuziunea noradrenalinei în citoplasmă pentru a se realiza metilarea acesteia de către feniletanolamin N-metiltransferază, folosind S-adenozilmetionina ca donator de metil. Adrenalina este captată apoi de granulele cromafine, unde rămâne stocată până la eliberare, ca principal hormon medulosuprarenal. Captarea și depunerea dopaminei, noradrenalinei și adrenalinei în granulele cromafine este un proces activ care necesită ATP, ioni de magneziu și o proteină specifică, denumită cromogranină. Complexul rezultat conține patru molecule de catecolamine pentru fiecare moleculă de ATP. Conținutul predominant adrealinic al medulosuprenalei atinge la om valoarea medie de 1 250 mg/g țesut proaspăt (Maas și Landis, 1971). Cu ajutorul precursorilor marcați, s-a stabilit că sinteza adrenalinei este de 1,3 mg/min/g de țesut glandular medulosuprarenal.

Sinteza și stocarea adrenalinei și noradrenalinei în cele două tipuri de granule cromafine este reglată de mai mulți factori. Stimularea inervației simpatică, de exemplu, crescând eliberarea de catecolamine medulosuprenale, activează tirozin hidroxilaza, ca urmare a îndepărtării *feed-back*-ului negativ exercitat asupra sa de către noradrenalina. Pe de altă parte, cortizolul, activând N-metiltransferaza, intensifică selectiv sinteza adrenalinei.

La rândul său, ACTH potențează atât direct tirozin hidroxilaza și dopamin beta-hidroxilaza, cât și indirect, prin intermediul cortizolului, biosinteza catecolaminelor suprenale în condiții de stres. Unele medicamente, cum sunt reserpina sau guanetidina, din contră, golesc depozitele de catecolamine din granule, împiedicând refacerea și stocarea acestora, cu consecințe funcționale deprimate asupra tonusului simpatico-adrenergic.

Eliberarea hormonilor catecolaminici se realizează prin exocitoză, sub influența influxului nervos simpatic, cu participarea acetilcolinei ca mediator chimic și a ionilor de calciu ca factor de cuplare a excitației cu secreția. Calciul poate fi înlocuit cu stronțiu sau bariu, dar nu și de către magneziu, care exercită un puternic efect inhibitor asupra eliberării de catecolamine. Eliberarea zilnică bazală a adrenalinei este de 150 mg. Concomitent cu exocitoza acesteia, în timpul stimulării nervoase simpatică se eliberează din granulele secretoare și enzima dopamin beta-hidroxilaza. O mare parte din catecolaminele eliberate, și îndeosebi dopamina, sunt sulfoconjugate în plasmă, reprezentând forma de transport și degradare a acestora fără activitate biologică.

Concentrația plasmatică bazală a adrenalinei libere este de 25–50 pg/ml. Ea prezintă mari variații normale și patologice. Simpla trecere de la clinostatism determină creșterea adreolinei cu 30–50%. În timpul efortului fizic intens, creșterea poate atinge 400–500%. Hipoglicemia, de asemenea, crește eliberarea adrenalinei proporțional cu intensitatea acesteia, ajungând, în cazul unei scăderi modeste a glucozei din sânge (60 mg/dl), la valoarea de 250 pg/ml. La rândul său, adrenalina exogenă, în concentrații fiziologice de 150–200 pg/ml, provoacă hiperglicemie și reacții cardio-vasculare presoare.

Concentrația noradrenalinei din plasmă variază între 70 și 400 pg/ml. Deși este cu mult mai mare decât a adrenalinei, efectele sale metabolice se produc la doze superioare celor fiziologice. Hipoglicemia, de exemplu, modifică puțin conținutul în noradrenalina al plasmăi, iar aceasta nu crește conținutul în glucoză al sângelui decât la doze foarte mari. De aici rezultă că adevăratul hormon medulosuprarenal este adrenalina. Având timp de înjumătățire scurt, doar de 2–3 minute, atât adrenalina, cât și noradrenalina dispar rapid din plasmă.

Metabolizarea catecolaminelor se efectuează fie prin oximetilare și formare de metanefrină și normetanefrină sub influența enzimei catecoloximetiltransferaza (COMT), fie prin dezaminare oxidativă cu ajutorul monoaminoxidazei (MAO) și al aldehid oxidazei (AO), urmate de oximetilare de către COMT și transformare în acid vanilmandelic (AVM) (fig. 13.17).

În cazul dopaminei, produsul de degradare finală este acidul homovanilic. În timp ce AVM urinar reflectă cantitatea totală de adrenalina și noradrenalina tisulară, metanefrina și normetanefrina oferă indicații numai asupra fracției circulante a acestora.

O a treia cale de inactivare este reprezentată de recaptarea ca atare, fără degradare, a catecolaminelor, în granulele de depozit ale țesutului cromafin. Rinichiul excretă sub formă liberă doar 3–5% din cele trei catecolamine. În urina umană normală din 24 de ore se găsesc 3–4 mg AVM, 100–200 mg metanefrină, 150–300 mg normetanefrină, 20–40 mg noradrenalina și 2,5–10 mg adrenalina. Dozarea spectrofluorimetrică a acestora sau a catecolaminelor plasmatică evidențiază gradul de participare a sistemului simpatico-adrenergic la producerea diverselor reacții neuro-endocrine normale și patologice.

Efectele biologice ale adrenalinei și noradrenalinei eliberate în sângele

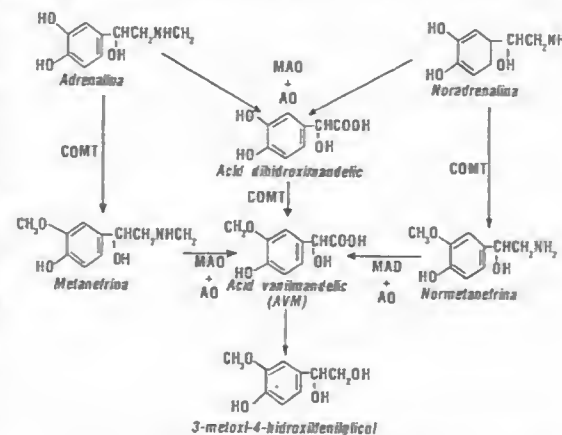


Fig. 13.17. Căile de metabolizare ale adrenalinei și noradrenalinei.

circulant de către glandele medulosuprenale și neuronii simpatici depind de afinitatea acestora față de receptorii membranari adrenergici de la nivelul jesuturilor și sunt asigurate de prezența și densitatea celor două tipuri de receptori adrenergici (alfa și beta), cu subtipurile respective (alfa₁ și alfa₂, beta₁ și beta₂).

Funcțiile celor patru subtipuri de receptori adrenergici sunt diferențiate atât din punct de vedere al localizării acestora, cât și al acțiunilor fizio-farmacologice exercitate de adrenalina și noradrenalina.

În general, receptorii alfa₁-adrenergici se găsesc la nivelul vaselor pielii, mucoaselor intestinului, rinichinului, plămânului și creierului, precum și la nivelul uterului, irisului, hepatocitelor și celulelor pancreatice. Stimularea lor provoacă contracția musculaturii netede vasculare, uterine, pupilare și pilomotorii. Pe plan metabolic, ei produc hiperglicemie, ca urmare a activării glicogenolizei hepatice și inhibării secreției de insulină.

Receptorii alfa₂-adrenergici au sediul presinaptic și excitarea acestora provoacă, printre altele, inhibarea eliberării presinaptice și relaxarea musculaturii netede vasculare și intestinale.

La rândul lor, receptorii beta₁-adrenergici predomină la nivelul fibrelor miocardice, adipocitelor și celulelor hepatice, producând prin stimularea creșterea contractilității și frecvenței cardiace, lipoliză și glicogenoliză dublată de gluconeogeneză.

În sfârșit, receptorii beta₂-adrenergici se găsesc din abundență atât la nivelul vaselor coronare, cerebrale, al mușchilor striai, bronhiilor, intestinului și miometrului, cât și în pancreas, tiroidă, paratiroidă și aparatul juxtaglomerular renal, cu rol vasodilatator și miorelaxant, în primul caz, și stimulator al secrețiilor de glucagon, tiroxină, parathormon și renină, în cel de al doilea.

Principalele acțiuni ale adrenalinei și noradrenalinei mediate de receptorii adrenergici sunt menționate în tabelul 13.III.

În timp ce noradrenalina acționează cu predominanță asupra alfa-receptorilor adrenergici, adrenalina își exercită efectele asupra ambelor tipuri de receptori. Din interacțiunea catecolaminelor cu receptorii alfa-adrenergici rezultă scăderea cAMP, dublată de creșterea probabilității a cGMP.

Fenomene inverse se produc prin activarea beta-receptorilor adrenergici, reprezentate de creșterea cAMP, ca mesager intracelular. Prin intermediul receptorilor beta₁-adrenergici, de exemplu, adrenalina produce creșterea glucozei din sânge, ca urmare a activării glicogenolizei hepatice de către fosforilaza stimulată de cAMP.

Concomitent, adrenalina intensifică secreția de glucagon și o inhibă pe cea de insulină. Pe de altă parte, adrenalina activează lipaza din jesutul adipos în vederea eliberării acizilor grași liberi și beta-oxidării lor în mușchi și ficat pentru a-i folosi ca substrat energetic.

Paralel cu efectele hiperglicemice și cetogene, adrenalina crește metabolismul bazal de peste 10 ori mai mult decât noradrenalina. Efectele sale metabolice de tip ergotrop sunt potențate de reacțiile cardio-vasculare adecvate deplasării substanțelor rezultate spre jesuturile beneficiare. Sub influența catecolaminelor circulante, debitul cardiac și presiunea sistolică cresc, deplasând cantități mai mari de substanțe nutritive la organele solicitate. Tipic este cazul efortului fizic, în care descărcarea hormonală medulosuprenală provoacă atât intensificarea de polimerizării glicogenului muscular și reutilizării lactatului rezultat din glicoliza anaerobă, cât și mobilizarea acizilor grași liberi ca material energetic de rezervă.

În afara reacțiilor metabolice și cardio-vasculare de adaptare la diversele solicitări, catecolaminele medulosuprenale produc manifestări psiho-comportamentale de frică-fugă sau furie-luptă pe cale nervoasă centrală.

Un loc important în producerea efectelor biologice ale hormonilor catecolaminici revine și receptorilor dopaminergici. Aceștia sunt, de asemenea, de două feluri: excitatori (DA₁) și inhibitori (DA₂). Primii (DA₁) fiind situați postsinaptic în cord și coronare, rinichi, vasele cerebrale și căile genito-urinare, activarea lor produce natriureză, vasodilatație și creșterea contractilității miocardice. Receptorii dopaminergici inhibitori (DA₂) sunt localizați presinaptic pe terminațiile periferice și centrale ale neuronilor adrenergici. Prin intermediul lor se realizează la oivel centrală modularea excitabilității căilor extrapiramidale și inhibiția secreției de prolactină de către PIP (dopamină).

În afara stimulării receptorilor dopaminergici propriu-ziși, dopamina în doze mici activează și receptorii beta₁-adrenergici de la nivelul fibrelor miocardice, determinând efecte inotrop, cronotrop și batmotrop pozitive. Acestea apar însă evidente în timpul stresului, când atât medulosuprenala, cât și nervii adrenergici devin temporar dopaminergici, ca urmare a activării mai mult a tirozinei hidroxilazei decât

TABELUL 13.III

Efecte mediate de receptori adrenergici			
Receptor (raportul eficienței adrenalină/noradrenalină)	Țesut	Localizare predominantă	Efect
alfa ₁ (N>A)	Musculatură netedă	Vase sanguine mari Vase subcutanate Vase mezenterice Vase renale Vase hepatice Vene Uter Miometru Iris Capsulă splenică Insule pancreatice Hepatocit Presinaptic	
alfa ₂ (N=A)	Endocrin Hepatic Neuroni și celule cromafine		Inhibitor; relaxare intestin
beta ₁ (A=N)	Miocard	Fibră miocardică	Inotrop + Cronotrop + Bazmotrop + Dromotrop + Lipoliză Glicogenoliză cu hiperglicemie Relaxare
	Țesut adipos Țesut hepatic	Adipocit Celulă hepatică	
	Musculatură netedă	Intestin	
beta ₂ (A>N)	Musculatură netedă	Vasele mușchilor striai Vase coronare Vase cerebrale Bronhii Intestin Miometru Glucagon Renină Parathormon Tiroxină Calcitonină Gastrină Melatonină	Vasodilatație Bronhodilatație Relaxare Relaxare Secreție
	Endocrin		

a dopamin beta-hidroxilazei. În general, descărcările prelungite de catecolamine produc scăderea numărului de receptori adrenergici, iar simpatectomia chimică sau chirurgicală crește numărul și sensibilitatea receptorilor la catecolaminele circulante.

Reglarea secreției medulosuprenale se realizează pe cale predominant nervoasă, cu participarea centrilor adrenalinosectori intranevraxiali. Aceștia se găsesc larg distribuiți de-a lungul întregului ax cerebro-spinal, de la măduva cervico-dorsală, până la nivelul hipotalamusului posterior. Excitarea directă sau reflexă a centrilor noradrenalinosectori provoacă o puternică descărcare de catecolamine suprenale, cu condiția ca nervii splanhnici să fie intacti. Secționarea acestora scade brutal secreția de catecolamine, până la 1/100 din debitul secretor bazal, realizând o adevărată secreție paralișcă, iar distrugerea măduvei cervico-dorsale produce șocul spinal.

Neuronii preganglionari spinali ai splanhnicului fiind sub dependența structurilor nervoase simpatice din bulb și hipotalamus, excitarea lor directă sau reflexă intensifică secreția de catecolamine simpatico-adrenale. Eliberarea predominantă de adrenalina asigură, împreună cu descărcările hormonale hipotalamo-

hipofizo-corticosuprarenale, reacțiile de apărare și rezistență la numeroasele suprasolicitări stresante normale și patologice ale organismului. Făcând parte integrantă din reacțiile neuro-endocrino-metabolice adaptative la variațiile mediului extern sau intern, secreția de hormoni catecolaminici este stimulată atât prin relații intercentrale directe, de către stările de încordare neuro-psihică, anxietate, emoții sau durere, cât și neuro-reflex, de către anoxie, hemoragii, traumatisme, hipoglicemie, expunere la frig, efort fizic și alte solicitări stresante. Descărcările hormonale medulosuprarenale însoțesc creșterea tonusului vegetativ simpatic, potențând și prelungind în timp efectele activării nervoase simpatico-adrenergice. La producerea reacțiilor adrenergice integrate participă și factorii umorali activatori ai secreției de catecolamine, cum sunt acetilcolina, ionii de potasiu, histamina, bioxidul de carbon și cataboliții acizi în general. La rândul lor, catecolaminele circulante provoacă – prin intermediul zonelor reflexogene sino-carotidiană și endocardio-aortică – reacții cardiovasculare și metabolice compensatoare de tip depresor, în vederea restabilirii tonusului simpatico-adrenergic bazal. La autoreglarea neuro-reflexă se adaugă reglarea locală atât a biosintezei catecolaminelor hormonale, cât și a sensibilității receptorilor adrenergici, anterior menționate. În felul acesta, controlul funcției medulosuprarenale se realizează la două niveluri: al secreției de catecolamine și al receptorilor simpatico-adrenergici tisulari.

13.3. GONADELE

Gonadele sunt glande mixte cu structură și funcții diferite la bărbat și femeie, indispensabile dezvoltării organelor genitale, gametogenezei și reproducerii.

Reprezentate de testicule la bărbat și de ovare la femeie, gonadele îndeplinesc, ca și pancreasul, o dublă funcție:

- exocrină, de formare a spermatozoizilor la bărbat și a ovocitelor la femeie;
- endocrină, de sinteză și secreție a hormonilor androgeni, estrogeni și progestativi sau gestageni.

Sexul, deși are determinare genetică, dezvoltarea caracterelor sexuale primare (gonade și organe genitale externe) și secundare (conformație somatică, pilozitate, glande mamare, comportament psihic etc.) depinde de secreția internă a gonadelor. Acestea prezintă particularități morfo-funcționale specifice celor două sexe.

13.3.1. GONADELE FEMININE

Ovarele, ca gonade feminine, sunt sediul atât al proceselor de formare și expulzare periodică a celulelor sexuale feminine, cât și al secreției de hormoni estrogeni și progestativi, cu acțiuni diferențiate asupra organelor genitale externe.

Funcția exocrină a ovarelor este reprezentată de procesele de ovogeneză și ovulație, influențate de hormonii gonadotropi hipofizari.

Ovogeneza, ca proces de formare și maturare a gameților feminini, începe încă din perioada fetală și se termină la menopauză. La pubertate, numărul foliculilor primordiali este de 300 000–400 000. Dintre aceștia, doar 350–400 se maturează, participând la procesul de ovulație. Restul foliculilor degenerază, devenind atrezici. Maturarea se realizează prin trecerea de la stadiul de folicul primordial, constituit dintr-un ovocit situat excentric și înconjurat de un singur strat de celule granulare (foliculare), la stadiul de folicul primar și secundar. Aceștia din urmă sunt foliculi cavitari sau antrali, în care ovocitul, cu diametrul de 100–150 mm, este înconjurat de mai multe straturi de celule foliculare (granuloase și tecale), prevăzute cu proprietăți secretoare de lichid folicular. Sub influența FSH hipofizar, unul din foliculii secundari de la suprafața ovarului se maturează periodic după menstră, transformându-se în folicul de Graaf, sau terțiar. Acesta este deplin constituit între zilele a 10-a și a 14-a de la începutul ciclului menstrual. El apare ca o veziculă destinsă de lichidul folicular din cavitatea antrală, în care ovulul matur atinge 200 mm în diametru, prezentând un nucleu veziculos situat excentric.

Datorită presiunii intrafoliculare crescândă se produce dehiscența foliculului vezicular, urmată de eliminarea ovulului în cavitatea peritoneală. Acest proces complex de rupere și eliminare a ovulului, denumit *ovulație*, se realizează sub influența predominantă a LH hipofizar în ziua a 14-a la femeia cu ciclul sexual normal de 28 de zile. Spre deosebire de FSH, care asigură maturarea foliculară, LH este necesar atât finalizării procesului de creștere foliculară, cât și ovulației și formării ulterioare a corpului galben.

La maturarea și expulzia lunară a unui singur ovul, determinată de efectul sinergic al FSH și LH, contribuie și hormonii estronici eliberați de foliculul mai dezvoltat, ca factori locali de stimulare atât a proliferării celulelor granulare, cât și a numărului de receptori pentru FSH, în vederea creșterii sensibilității acestora la gonadostimulina respectivă.

Concomitent cu dezvoltarea foliculului supus maturării, se produc involuția și atrezia foliculilor din jur, cu participarea unui factor inhibitor al maturării foliculare (OMI) de natură peptidică, rezultat din acțiunea enzimelor proteolitice eliberate de celulele granuloase ale foliculului dominant.

După expulzare, ovulul este atras și dirijat spre trompa uterină în vederea eventualei fertilizări. În acest timp continuă diviziunea meiotică, determinând perfectarea ovulului haploid cu 23 de cromozomi și apariția corpilor polari. Elementele reziduale ale foliculului rupt formează – sub influența LH hipofizar – o nouă structură endocrină, corpul galben. Acesta va contribui prin hormonii progestativi eliberați la optimizarea condițiilor de implantare, menținerea și dezvoltarea zigotului în cavitatea uterină până la formarea placentei, în cazul când a avut loc fertilizarea. Dacă nu s-a produs fertilizarea, corpul galben începe să regreseze după 12 zile de la ovulație, prezentând fenomene de luteoliză și necroză progresivă, ce duc la formarea unei cicatrice avasculare denumite corpus albicans. Involuția corpului galben, fiind însoțită de reducerea brutală a secreției sale hormonale, va determina în următoarele 48 de ore vasospasmul stratului vascular al endometriului și necroza acestuia. Prezentând numeroase zone hemoragice, endometrul necrozat se va descuama și elimina împreună cu mici cantități de sânge (50–100 ml) în zilele care urmează, sub forma fluxului menstrual. Acesta este incoagulabil, din cauza prezenței unei fibrinolizine eliberate de la nivelul endometriului necrotic. În 3–5 zile de la începutul menstruației, pierderea de sânge încetează odată cu reepitelizarea endometriului, permițând reluarea ciclului utero-ovarian. Conținutul bogat în leucocite al fluxului menstrual crește rezistența la infecție a uterului denudat în timpul menstruației.

Funcția endocrină a ovarelor constă în secreția a două feluri de hormoni sexuali feminini – *hormonii estrogeni*, produși de celulele foliculare, și *hormonii progestativi*, eliberați de corpul galben. În timp ce hormonii estrogeni sunt secretați la femeia gravidă de celulele interstițiale (tecale) ale foliculului dominant în plină maturare, hormonii progestativi sunt produși de secreție ai celulelor luteale din corpul galben.

Din punct de vedere chimic, hormonii ovarieni aparțin hormonilor cu structură sterică, având la bază nucleul ciclopentanoperhidrofenantrenic. Ei sunt sintetizați, ca și hormonii corticosteroizi, din colesterolul preluat din sânge sau sintetizat din acetil coenzima A, trecând prin etapele intermediare de pregnenolon, progesteron și testosteron (fig. 13.18).

În cazul estrogenilor, secreția este asigurată aproape exclusiv de ovare, în afara gravidității, și în mod predominant de către placenta, în timpul sarcinii. Principalul hormon estrogen este *beta-estradiolul*. Din aceeași categorie face parte *estronea*, rezultată din transformarea testosteronului la nivel uterin, și *estriolul*, ca produs de degradare hepatică a celor doi hormoni estrogeni. Proprietățile estrogenice ale beta-estradiolului sunt de 12 ori mai puternice decât ale estronei și de 80 de ori mai intense decât ale estriolului. Pentru acest motiv, beta-estradiolul este considerat hormonul estrogenic major, deși nici estronea nu este de neglijat.

Dintre hormonii progestativi sau gestageni, cel mai important este *progesteronul*. La femeia gravidă, acesta este secretat în cantități mari numai în cea de a doua parte a ciclului ovarian de către corpul galben. La gravide, progesteronul este secretat și de placenta, mai ales din luna a 4-a de sarcină. Mici cantități de 17-hidroxiprogesteron sunt eliberate concomitent cu progesteronul, atât în afara, cât și în timpul sarcinii.

Transportul estrogenilor și progesteronului în sânge se realizează sub formă legată cu albuminele și în mai mică măsură cu globulinele din plasmă. Legătura cu proteinele plasmatice este însă slabă, permițând eliberarea rapidă a hormonilor spre țesuturi, în 5–20 de minute. Ficatul conjugă o mare parte din estrogeni, transformându-i în glucuronizi și sulfați, pentru a fi apoi excretați prin bilă și urină. Restul de estrogeni activi (estradiol și estronă) este convertit de ficat în estriol inactiv. În insuficiența hepatică, activitatea estrogenilor apare crescută datorită inactivării lor deficitare.

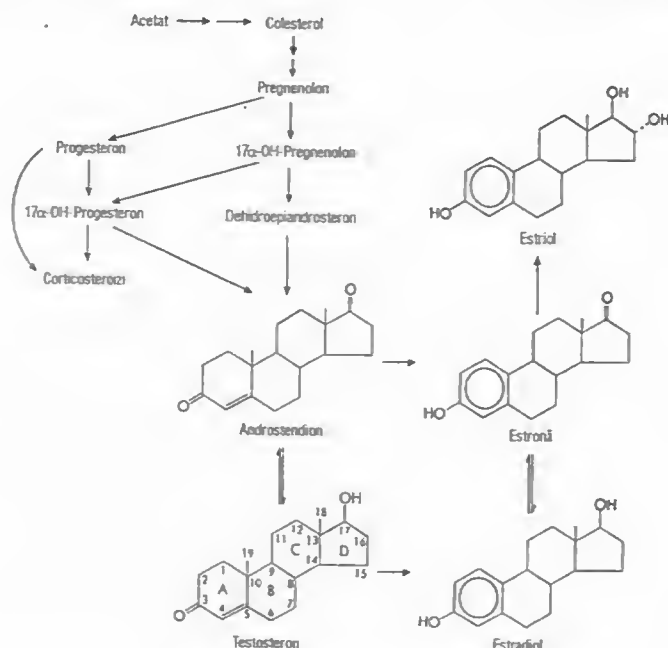


Fig. 13.18. Biosinteza hormonilor gonadali.

Soarta progesteronului circulant depinde, de asemenea, de capacitatea de inactivare a ficatului. Principalul produs de degradare a progesteronului este pregnandiulol. În afara acestuia, alți derivați inactivi sunt formați la nivel hepatic în minutele următoare lansării progesteronului în circulație. Pregnandiulol urinar, reprezentând aproximativ 10% din progesteronul circulant, dozarea acestuia oferă indicații asupra secreției ovariene de progesteron.

Acțiunile și funcțiile hormonilor ovarieni sunt multiple și specifice estrogenilor și progesteronului. Ele privesc atât caracterele sexuale primare, cât și caracteristicile secundare ale sexului.

În cazul estrogenilor, funcția principală a acestora este de a stimula creșterea și proliferarea celulară la nivelul organelor sexuale și al altor țesuturi implicate în reproducere. Efectele asupra uterului și organelor genitale externe sunt neînsemnate în timpul copilăriei. Odată cu pubertatea, secreția de hormoni estrogeni, crescând sub influența gonadotrofinelor hipofizare de peste 20 de ori, stimulează dezvoltarea uterului, trompelor, vaginului și labiilor. În plus, estrogenii transformă epitelul vaginal din cuboidal în stratificat, care este mai rezistent la traume și infecții decât epitelul prepuberal.

Mai importante decât creșterea în dimensiuni a organelor genitale sunt modificările care au loc la nivelul endometrului. Sub influența estrogenilor se produc proliferarea stromei endometriale și dezvoltarea glandelor implicate în nutriția ovulului implantat în mucoasa uterină. La nivelul trompelor uterine se produc fenomene proliferative similare celor din endometru, dublate de intensificarea motilității cililor în vederea deplasării ovulului fertilizat spre cavitatea uterină. Concomitent, estrogenii stimulează creșterea și dezvoltarea sânilor la femeie, ca urmare a dezvoltării țesutului stromal, sistemului canalicular și depunerii de grăsime în teritoriul glandular mamar. Transformarea țesutului mamar în organ producător de lapte este realizată de către progesteron și prolactină.

Pe plan metabolic, hormonii estrogeni provoacă activarea sintezei proteice și intensificarea depunerii de grăsime în țesutul subcutanat. Aceste efecte sunt însă mai slabe decât ale testosteronului.

La nivelul oaselor, estrogenii stimulează activitatea osteoblastelor și favorizează creșterea rapidă în perioada pubertății. Acest efect este urmat de osificarea cartilajului de creștere, ducând la încetarea dezvoltării staturale mai devreme la femeie decât la bărbat. Deficitul de hormoni estrogeni în perioada de creștere se însoțește de o exagerare a dezvoltării staturale. După menopauză, odată cu încetarea secreției de estrogeni, reducându-se activitatea osteoblastelor și depunerea calciului în oase, apare tendința la osteoporoză și la fracturi osoase.

Asupra pielii, estrogenii acționează în sensul îmbunătățirii vascularizației și a supleei sale. Apariția acneei ține mai mult de secreția crescută a androgenilor adrenalii, decât de estrogenii ovarieni. Asemănarea lor chimică cu hormonii corticosteroizi le conferă proprietăți slabe mineralocorticoide, de reținere a sodiului și apei la nivelul tubilor renali. La nivel celular, hormonii estrogeni se combină cu un receptor citoplasmatic care îi transportă la nucleu. În nucleu, estrogenii acționează asupra ADN cromozomial, determinând procesul de transcripție și formare a ARN care, difuzat în citoplasmă, va intensifica sinteza de proteine până la alterarea funcției celulare.

Progesteronul își exercită efectele biologice mai ales la nivelul endometrului uterin, determinând modificări ale secreției în cea de a doua jumătate a ciclului sexual feminin, în vederea nidării ovulului fertilizat. La acestea se adaugă scăderea frecvenței contracțiilor uterine pentru a preveni expulzia ovulului implantat. În același sens este influențată mucoasa trompelor uterine, pentru a asigura nutriția ovulului în timpul deplasării sale spre uter. La nivelul sânilor, progesteronul pregătește glanda mamară pentru secreția lactată. El provoacă proliferarea celulelor alveolare și dezvoltarea lobulilor și acinilor glandulari, asupra cărora va acționa apoi prolactina, ca hormon stimulant al secreției lactate.

Contrar estrogenilor, progesteronul exercită efecte catabolice asupra proteinelor țesutului și creșterea secreției de sodiu și apă. Dacă, în timpul ciclului sexual normal, efectele catabolice nu sunt semnificative, ele contribuie la mobilizarea proteinelor în timpul sarcinii, pentru a folosi creșterii fătului. La rândul lor, efectele natriuretice și diuretice au la bază competiția dintre progesteron și aldosteron de la nivelul epitelului tubular renal pentru un receptor comun. Combinarea acestuia cu progesteronul împiedică activarea resorbției tubulare de sodiu și apă de către aldosteron. În afara efectelor periferice, progesteronul crește excitabilitatea centrilor cardio-respiratori și termoregulatori. Prin acest mecanism se produc activarea respirației, accelerarea pulsului și creșterea temperaturii matinale cu 0,3–0,5°C în faza luteală a ciclului utero-ovarian lunar.

13.3.1.1. Ciclul ovarian endometrial și menstruația

Datorită efectelor diferite ale hormonilor estrogeni și progestativi asupra sferei genitale, variațiile periodice ale activității secretorii ovariene produc o serie de modificări specifice la nivelul mucoasei uterine. Acestea constituie ciclul endometrial ce urmează celui ovarian cu durată medie de 28 de zile. Spre deosebire de ciclul ovarian, care este dominat de gonadotrofinile hipofizare, cel uterin (endometrial) este sub controlul hormonilor ovarieni. Variațiile concentrațiilor plasmatice ale gonadotrofinelor (FSH, LH) și hormonilor ovarieni din timpul ciclului sexual normal sunt ilustrate în figura 13.19.

Ciclul endometrial poate fi împărțit din punct de vedere fiziologic în trei faze secvențiale: foliculară, ovulatorie și luteală.

Faza foliculară, sau proliferativă, este faza inițială a ciclului utero-ovarian lunar, cu durată medie de 14 zile, în care mucoasa uterină proliferază sub influența estrogenilor, secretați în cantități crescând de către foliculul de Graaf în curs de maturare. În această fază se realizează refacerea endometrului descumant și eliminat în timpul fluxului menstrual, pe seama proliferării celulelor stromale și epiteliale. Dacă în prima jumătate a fazei foliculare este crescută numai secreția de FSH, urmată de creșterea progresivă a secreției de estrogeni, în cea de a doua jumătate predomină creșterea acestora, urmată de scăderea FSH și descărcarea preovulatorie a LH.

Faza ovulatorie, cu durată de 1–2 zile, culminează cu spargerea foliculului maturat și eliminarea ovulului sub influența LH hipofizar. Creșterea concentrației plasmatice a acestuia de 6–10 ori cu aproximativ

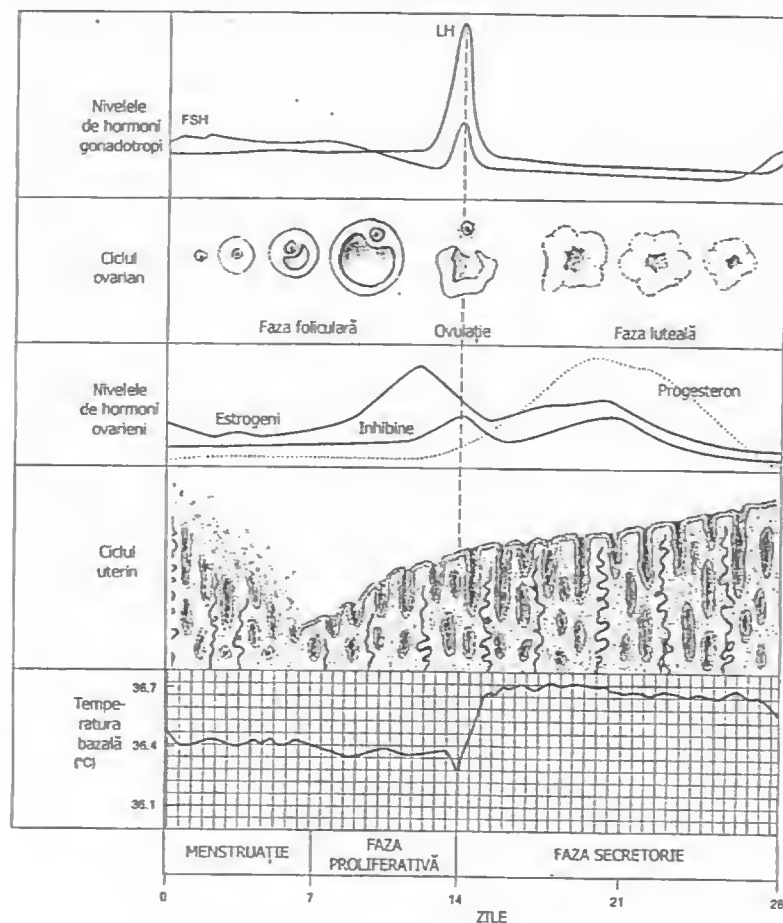


Fig. 13.19. Variațiile hormonilor gonadali din timpul ciclului ovarian la femeie.

două zile înaintea ovulației, urmată de scăderea estrogenilor (faza preovulatorie), constituie condiția obligatorie a ruperii și expulziei ovulului spre cavitatea uterină.

Faza luteală are o durată constantă de 13-14 zile și sfârșește cu eliminarea ovulului odată cu mucoasa uterină descuzmată, ca urmare a degradării sale în lipsa hormonilor ovarieni. Fluxul menstrual, apărut la sfârșitul fazei luteale și începutul fazei proliferative, are la bază modificări ciclice ale activității secretorii exocrine și endocrine ovariene generate de gonadotropinele hipofizare cu răsunet corespunzător uterin. Variațiile în plus sau în minus ale ciclului sexual lunar se datoresc, în majoritatea cazurilor, capacității variabile de refacere a endometriului din timpul fazei proliferative (estrogene) a ciclului.

13.3.1.2. Reglarea secreției ovariene

Funcția secretorie ovariană depinde de interacțiunea dintre neurohormonii hipofizotropi hipotalamici, gonadotropinele adenohipofizare și hormonii steroizi ovarieni. Hipotalamusul este sediul proceselor de control integrat al secreției ciclice de hormoni eliberatori ai gonadotropinelor hipofizare (FSH și LH). Deși s-a emis ipoteza existenței a doi factori eliberatori hipotalamici pentru fiecare din cele două gonadotropine, majoritatea autorilor admit că hormonul eliberator de LH (**LHRH**, *luteinizing hormone releasing hormone*) asigură eliberarea succesivă a ambelor gonadotropine hipofizare. LHRH (gonadoliberina) sau GnRH (*gonadotrophin releasing hormone*) este un decapeptid, secretat de regiunea medio-bazală a hipotalamusului sub influența unui centru din aria preoptică, ce cauzează variațiile ciclice ale secreției ovariene, și a altuia din hipotalamusul posterior, implicat în modificările eliberării de gonadotropine produse de factorii psihici. Pe plan funcțional, s-a descris un centru tonic în regiunea hipotalamică ventro-mediană și un centru ciclic în nucleii: preoptic, suprachiasmatic și arcuat. Ambii centri sunt dependenți de aria hipotalamică posterioară. La rândul său, centrul ciclic primește impulsuri senzoriale vizuale, auditive, olfactive și tactile de la analizatorii respectivi. Alte structuri nervoase centrale sunt, de asemenea, interesate în modularea secreției de LHRH. Din această categorie fac parte nucleul amigdalian, implicat în comportamentul sexual, și fasciculul arcuat, cu rol în vorbire, a căror stimulare determină eliberare masivă de LHRH în sângele portal hipofizar.

Sinteza și eliberarea pulsătilă de LHRH este reglată atât prin *feed-back* scurt de LH hipofizar, cât și prin *feed-back* lung de către hormonii ovarieni cu participarea acetilcolinei, noradrenalinei, dopaminei, serotoninei și GABA ca mediatori chimici. Estradiolul și progesteronul modulează eliberarea ciclică a gonadotropinelor hipofizare prin efectele bifazice produse de *feed-back*-ul negativ și cel pozitiv exercitate la nivelul gonadostatului hipotalamic și hipofizei anterioare (fig. 13.20). La controlul secreției hipotalamo-hipofizare de către hormonii ovarieni participă și inhibina, compusă din două subunități peptidice (A și B), legate printr-o punte disulfidică, secretată de corpul galben. Aceasta contribuie la inhibarea secreției de LH și FSH la sfârșitul fazei luteale a ciclului ovarian lunar.

Efectul inhibitor maxim este realizat însă de estradiol. Administrarea acestuia suprimă secreția tonică și ciclică de FSH, în timp ce ovariectomia o crește. În afara *feed-back*-ului negativ exercitat de estrogeni asupra secreției de FSH la sfârșitul fazei proliferative a ciclului ovarian lunar, estradiolul este responsabil de *feed-back*-ul pozitiv produs asupra secreției predominante de LH din perioada preovulatorie a foliculului maturat, ca urmare a modificărilor de reactivitate ale complexului hipotalamo-hipofizar și comutării efectelor LHRH pe receptori celulelor hipofizare secretare de LH. Descărcarea maximă de LH și, în mică măsură, de FSH din perioada preovulatorie asigură ovulația și dezvoltarea corpului galben secretor de progesteron. Secreția crescândă a acestuia devenind maximă în zilele a 8-a – a 9-a ale fazei luteice

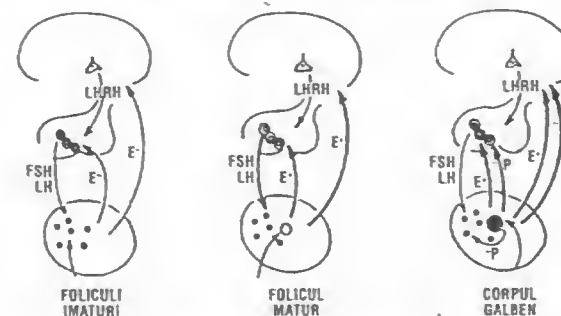


Fig. 13.20. Autoreglarea gonadotropinelor hipofizare de către hormonii ovarieni. E⁻, inhibiție estrogenică; E⁺, activare estrogenică; P, inhibiție progesteronică.

contribuie, împreună cu inhibina, la suprimarea *feed-back*-ului pozitiv estrogenic, urmată de deprimarea secreției hipotalamo-hipofizare și de involuție utero-ovariană premenstruală. Totodată, progesteronul inhibă prin acțiunea directă dezvoltarea foliculară.

Eliberarea hipotalamsului și hipofizei anterioare de sub controlul inhibitor al progesteronului și estrogenilor spre sfârșitul ciclului sexual feminin permite FSH, chiar din prima zi a menstruației, să crească de 2-3 ori, pentru a iniția dezvoltarea și maturarea oului nou folicul dominant. Așadar, nu numai activitatea secretorie a ovarelor este reglată de complexul hipotalamo-hipofizar, ci și secreția ciclică de LHRH hipotalamic și gonadotrofine hipofizare se află sub controlul permanent al secreției hormonale ovariene de la pubertate până la menopauză. În timp ce scăderea secreției de FSH are loc sub influența creșterii concentrației estrogenilor din plasmă, cea a LH se realizează cu participarea predominantă a progesteronului.

13.3.1.3. Pubertatea

Pubertatea începe la vârsta de 11-15 ani, odată cu intrarea în stare de activitate secretorie a ovarelor sub influența gonadotrofinelor hipofizare. Dacă în timpul vieții fetale ovarele erau active datorită gonadotrofinei corionice secretate de placenta, după naștere ele devin inactivă până în perioada prepuberală (8-10 ani). Creșterea progresivă a secreției de gonadotrofine hipofizare (FSH și LH) duce la instalarea vieții sexuale, respectiv a pubertății, și la apariția menstruației (menarha). Acestea se datoresc maturării structurilor nervoase centrale, cum ar fi sistemul limbic, care controlează activitatea tonică și ciclică a centrilor hipotalamici secretori ai celor două gonadotrofine, cu răsunetul corespunzător utero-ovarian.

13.3.1.4. Menopauza

Menopauza corespunde încetării activității secretorii a ovarelor la vârsta de 45-50 de ani, când s-a epuizat stocul de foliculi primordiali, capabili de maturare sub influența FSH hipofizar. Pe măsură ce numărul foliculilor primordiali scade, ciclul ovarian devine neregulat, iar secreția insuficientă de estrogeni și progesteron nu mai poate inhiba eliberarea succesivă de FSH și LH hipofizari, oecesară activității secretorii ciclice a ovarelor. În lipsa hormonilor ovariei, complexul hipotalamo-hipofizar continuă să secrete mari cantități de gonadotrofine, fără răspuns uterin generator de flux menstrual. În aproximativ 15% din cazuri, lipsa estrogenilor provoacă bufeuri de căldură, dispnee, oboseală, anxietate și chiar dereglări psihice trecătoare.

13.3.2. GONADELE MASCULINE

Testiculele, ca și ovarele, posedă o dublă funcție secretorie: exocrină și endocrină.

13.3.2.1. Funcția exocrină a testiculelor

Funcția exocrină constă în capacitatea testiculelor de a produce spermatozoizi (gameți masculi) sub influența hormonilor gonadotropi hipofizari.

Spermatogeneza apare la vârsta de 12-13 ani în tubii seminiferi și continuă în tot restul vieții, parcurgând două principale etape. În prima etapă au loc procese de proliferare și înmulțire prin diviziune mitotică a celulelor epiteliale germinale, denumite spermatogonii.

Etapă a doua, de creștere și maturare a acestora, este dominată de diviziunea meiotică, formatoare de cromozomi nepereche. Spermatogoniile dispuse în 2-3 straturi de-a lungul marginii externe a epitelului tubular se transformă după mai multe diviziuni în spermatoците primare și secundare. Din spermatoците rezultă, printr-o nouă diviziune mitotică, spermatocele. Prin pierderea unei părți a citoplasmei, reorganizarea

cromatinei nucleare și alungirea restului celular al spermatocelelor, rezultă în săptămânile următoare spermatozoizii, constituiți din cap și coadă. Capul este format de nucleul condensat al celulei, acoperit de o membrană plasmatică fină, prevăzută în cele 2/3 anterioare cu o formațiune capsulară, denumită *acrozom*. Acesta conține enzime proteolitice similare celor din lizozomi, inclusiv hialuronidază, în vederea digeriilor filamentelor de proteoglicani ai membranei ovulare și a fertilizării ovulului. Coada spermatozoidului este formată dintr-un filament axial, constituit din 11 microtubuli, denumit axoemă, o membrană fină de acoperire a acesteia și din mitocodrii dispuse în segmentul proximal al cozii. Mișcarea flagelară a cozii este asigurată de energia rezultată din scindarea ATP mitocondrial, de către ATPaza filamentară. Întregul proces de formare și maturare a spermatozoidelor durează 70-75 de zile. Un rol important în spermatogeneză revine celulelor Sertoli. Acestea sunt celule mari, dispuse printre elementele constitutive ale epitelului germinal de la membrana bazală până în lumenul tubilor semioferi, cu rol nutritiv și secretor al lichidului spermatic cu pH alcalin (7,5-8,2). Totodată, celulele Sertoli contribuie la transformarea spermatocelelor în spermatozoizi și la eliberarea unor factori hormonal reglatori ai spermatogenezei, cum sunt estradiolul, inhibina și factorul inhibitor müllerian.

După formarea în tubii seminiferi, spermatozoizii sunt supuși unui proces de migrare spre epididim, canalul deferent și veziculele seminale. La oivelul epididimului, spermatozoizii se maturează, devenind capabili de motilitate și fertilizare. Mobilitatea spermatozoidelor maturi variază între 1-4 mm pe minut. Veziculele seminale nu sunt loc de depozitare a spermei, ci organe secretoare de prostaglandine, fructoză și fibriogen. În timpul procesului de emisie a spermei, veziculele seminale secretă un material mucoid bogat în substanțe nutritive și prostaglandine în canalul ejaculator. În timp ce substanțele nutritive (fructoză, acid ascorbic, fosfați, calciu etc.) asigură supraviețuirea spermatozoidelor până în momentul fertilizării ovulului, prostaglandinele favorizează fertilizarea, făcând mai receptiv mucusul cervical la spermă și intensificând contracțiile peristaltice inverse ale uterului și trompelor în vederea deplasării spermei spre ovare.

La rândul său, lichidul prostatic contribuie prin pH-ul alcalin la neutralizarea pH-ului acid al secreției vaginale și la creșterea motilității și fertilității spermatozoidelor. Acesta este bogat în citrați și fosfați de calciu, precum și în fosfatază acidă, a cărei concentrație crește în cancerul de prostată. Sperma finală este un lichid vâscos, de culoare alb-gălbui, cu reacție slab alcalină și miros caracteristic, ce conține aproximativ 100 000 de spermatozoizi pe ml. Limita de fertilizare variază în jurul a 20 000 de spermatozoizi pe ml.

Reglarea hormonală a spermatogenezei. Transformarea în trepte a celulelor germinale primordiale ale tubilor seminiferi în spermatozoizi maturi se realizează cu ajutorul mai multor factori hormonal. Printre aceștia figurează FSH, LH și hormonul de creștere, ca produși de secreție adenohipofizari, precum și testosteronul și estrogenii, ca hormoni gonadali.

FSH hipofizar intervine mai ales în etapa finală de transformare a spermatocelelor în spermatozoizi (spermiație), cu participarea obligatorie a celulelor Sertoli. În lipsa sa, procesul de spermiație nu are loc. Pe de altă parte, LH stimulează celulele Leydig secretoare de testosteron. Acesta este indispensabil atât diviziunii mitotice, formatoare de spermatoците, cât și diviziunii meiotice, de conversie a spermatocitului primar în spermatoцит secundar.

Hormonul de creștere stimulează procesele metabolice bazale ale testiculelor, inițiind diviziunea mitotică a spermatogoniilor și transformarea lor în spermatoците. În sfârșit, estrogenii secretați de celulele Sertoli stimulate de FSH participă, alături de testosteron, la maturarea spermatozoidelor. La rândul său, spermatogeneza inhibă secreția de FSH hipofizar prin intermediul inhibinei eliberate de celulele Sertoli.

Inhibina este o glicoproteină cu greutate moleculară între 10 000 și 30 000 de daltoni, izolată din culturi de celule Sertoli și prevăzută cu proprietatea de a inhiba secreția de FSH prin relații de *feed-back* negativ. În timp ce FSH stimulează celulele Sertoli pentru a asigura nutriția și dezvoltarea spermatozoidelor, inhibina eliberată de celulele Sertoli inhibă secreția de FSH (fig. 13.21). Astfel se menține ritmul constant al spermatogenezei necesar funcției normale de reproducere la hârbat.

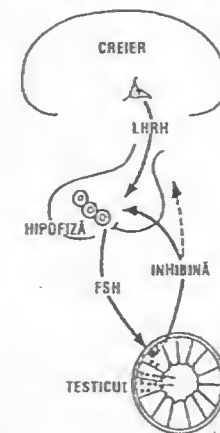


Fig. 13.21. Reglarea hipofizară a spermatogenezei.

13.3.2.2. Funcția endocrină a testiculelor

Această funcție constă în secreția hormonilor androgeni de către celulele Leydig situate în interstițiu dintre tubii seminiferi. Acestea constituie aproximativ 20% din masa testiculară. Rolul endocrin a fost cercetat cu ajutorul ablațiilor și grefelor testiculare sau al tratamentului de substituție cu preparate hormonale. Consecințele ablației diferă, în funcție de vârstă. Înainte de pubertate, castrarea oprește dezvoltarea organelor sexuale și împiedică apariția caracterelor secundare și a instinctului sexual. La adult, efectele castrării sunt mai puțin evidente, limitându-se la involuția organelor sexuale și reducerea virilității. Administrarea de extracte totale sau hormoni androgeni îndepărtează consecințele funcționale și metabolice ale ablației ori insuficienței testiculare produse atât înainte de pubertate, cât și la adult.

Hormonii sexuali masculini (androgeni) sunt *testosteronul*, *dihidrottestosteronul* și *androsteronul*. Toți sunt compuși steroizi sintetizați din colesterol sau din acetil coenzima A de către celulele Leydig testiculare și în mai mică măsură de celulele producătoare de androgeni ale zonei reticulate corticosuprenale. Secreția zilnică de testosteron (7 mg/zi la adult) predomină de departe asupra celorlalți doi hormoni testiculari și, de aceea, acesta este considerat principalul hormon androgen, deși o mică parte este convertit la nivel tisular cu ajutorul 5-alfa steroid reductazei în derivatul său mai activ, dihidrottestosteronul. Datorită acestui fapt, testosteronul a fost considerat drept prohormon al dihidrottestosteronului. Concentrația plasmatică a hormonilor testiculari este de 200–300 ng/dl până la pubertate și 600–700 ng/dl la adult (testosteron = 590 ng/dl).

După lansarea în circulație, testosteronul se găsește sub formă legată de o albumină sau globulină plasmatică timp de 15–30 de minute. O parte din testosteronul circulant este fixat în țesuturi și transformat în dihidrottestosteron sau 5 alfa-androstadiol, iar restul este degradat în produși inactivi la nivel hepatic, în vederea eliminării sub formă conjugată pe cale intestinală sau urinară.

Funcțiile *testosteronului* sunt intim legate de dezvoltarea caracterelor sexuale primare și secundare la bărbat. În cursul vieții fetale și în săptămânile următoare nașterii, secreția de testosteron este stimulată de gonadotrofina corionică de origine placentară. Ulterior, secreția de testosteron încetează, până la declanșarea pubertății sub influența gonadotrofinelor hipofizare. După 50 de ani, ea scade rapid, ajungând la 20% din valoarea maximă la vârsta de 80 de ani.

În timpul dezvoltării fetale, testosteronul favorizează creșterea organelor genitale specifice sexului și coborârea testiculelor în scrot în ultimele două luni de gestație. În cazul în care coborârea nu a avut loc înainte de naștere, administrarea de testosteron sau de gonadotrofină hipofizară stimulează secreția celulelor Leydig o va realiza în zilele sau săptămânile care urmează.

La pubertate, secreția de testosteron stimulează dezvoltarea atât a organelor genitale până la vârsta de 20 de ani, cât și a caracterelor sexuale secundare (piloșitate pubiană, toracică și facială, îngroșarea vocii și pielii, dezvoltarea musculaturii scheletice etc.). Proprietățile stimulante cutanate, soldându-se cu hipersecreția glandelor sebacee, determină adeseori acnee la adolescenți.

Efectele biologice ale hormonilor testiculari pot fi clasificate după locul sau modul lor de acțiune în androgenice și anabolice.

La rândul lor, efectele androgenice sunt parțial definite în cazul *testosteronului* și *dihidrottestosteronului* atât în perioada fetală, cât și în timpul creșterii pubertare. Astfel, în timp ce testosteronul stimulează în perioada fetală dezvoltarea diferențiată a epididimului, vaselor deferente și veziculelor seminale, dihidrottestosteronul asigură formarea penisului, uretrei peniene, scrotului și prostatei. În timpul creșterii pubertare, testosteronul stimulează mai ales spermatogeneza și dezvoltarea penisului, veziculelor seminale, laringelui și musculaturii scheletice, iar dihidrottestosteronul acționează cu predominanță asupra prostatei, scrotului, piloșității, glandelor sebacee și secreției prostatice. Pe plan comportamental, testosteronul stimulează potența și libidoul. La adult, efectele androgenice ale celor doi hormoni testiculari sunt intricate și întregite de chelie, îngroșarea pielii și anumite particularități ale efectelor anabolice. Acestea își pun de altfel amprenta pe toate acțiunile fizio-farmacologice ale hormonilor testiculari.

Efectele anabolice asigură creșterea, maturizarea și virilizarea pubertară în general, ca urmare a activării sintezei proteice și metabolismului fosfo-calcic la nivelul diverselor țesuturi și organe (musculatură scheletică, matrice osoasă, măduvă hematopoietică, țesut nervos etc.) și mai ales al celor implicate în funcția de reproducere. Ajunși la nivel celular, hormoni testiculari se fixează pe un receptor citoplasmatic comun,

care îi deplasează în nucleu pentru a acționa asupra ADN cromozomial, stimulând ARN-polimeraza și formarea de ARN ca principal loc de sinteză a proteinelor. Printr-un astfel de mecanism de intensificare a sintezei proteice se realizează creșterea masei musculare în timpul pubertății și efectele anabolizante clasice ale hormonilor testiculari la adult și vârstnici. Îmbunătățind vigoarea și forța musculară, testosteronul poate fi folosit la vârstnici ca „hormon de întinerire”. Asupra oaselor, hormoni testiculari exercită în perioada pubertară efecte de intensificare a osteosintezei și creșterii în lungime, ca urmare a formării crescute de matrice osoasă și depunerii sărurilor de calciu. Paralel cu îngroșarea oaselor, în perioada postpubertară se produce osificarea cartilajului de creștere și încetarea dezvoltării staturale. La adult, testosteronul provoacă retenție de azot, sodiu și apă prin mecanismul activării proceselor de resorbție tubulară. Cantitățile mari de testosteron produc creșterea metabolismului bazal și a numărului de hematii circulante cu 10–20%. La nivel hepatic este inhibată sinteza de globuline de legare și transport al cortizolului și hormonilor tiroidieni.

Reglarea secreției de hormoni testiculari. Funcția sexuală la bărbat este, ca și la femeie, sub controlul permanent al gonadotrofinelor hipofizare, cu acțiune distinctă asupra secreției exocrine și endocrine a testiculelor. Spre deosebire de spermatogeneză, care depinde de activitatea reglatoare a FSH, secreția endocrină a testiculelor este sub influența stimuloare a LH hipofizar. Acesta se mai numește și ICSH (*interstitial cell stimulating hormone*), întrucât stimulează celulele interstițiale descrise de Leydig. Pentru a sublinia rolul LH, identic din punct de vedere chimic cu ICSH în reglarea secreției hormonale testiculare, s-a descris axul hipofiză-celulă Leydig. Acesta funcționează după principiul conexiunii inverse, realizând relații de *feed-back* negativ și pozitiv, cu participarea hormonilor testiculari, pe de o parte, și a factorului hipotalamic eliberator de gonadotrofine hipofizare, pe de altă parte. Hipotalamusul reprezintă calea comună finală prin care toate excitațiile exteroceptive, interoceptive și intercentrale influențează activitatea complexului hipotalamo-hipofizo-gonadal atât la femeie, cât și la bărbat. De aici, rolul pozitiv sau negativ al diversilor stimuli neuro-reflecși și psiho-emoționali asupra fertilității. Deși hipofiza secretă două gonadotrofine, hipotalamusul asigură eliberarea pulsatilă a acestora cu ajutorul unui singur neurohormon, denumit impropriu LHRH (*luteinizing hormone releasing hormone*) sau gonadoliberină. Sub influența acestuia este stimulată secreția de LH (ICSH), care, la rândul său, provoacă hiperplazia celulelor Leydig din testicul și producția crescută de hormoni testiculari de la pubertate până la bătrânețe. Secreția de testosteron, ca principal hormon androgen, este direct proporțională cu cantitatea de LH lansată în circulație. Prolactina potențează efectul stimulant al LH hipofizar asupra producerii și secreției de testosteron. În timpul gestației, placenta secretă mari cantități de gonadotrofină corionică cu structură aproape identică cu a LH și cu acțiune stimuloare asupra celulelor Leydig ale fătului, în vederea producerii de testosteron necesar dezvoltării organelor sexuale masculine.

Excesul de testosteron circulant inhibă secreția de LH atât direct, cât și indirect, prin intermediul LHRH hipotalamic. Astfel, testosteronul își limitează propria secreție prin relațiile sale de *feed-back* cu complexul hipotalamo-hipofizar (fig. 13.22). Când concentrația testosteronului circulant este scăzută, lipsa inhibiției hipotalamice duce la revenirea secreției normale a acestuia. Prin intermediul releului umoral hipotalamic se realizează nu numai autoreglarea secreției exocrine și endocrine testiculare, ci și apariția și instalarea pubertății.

Pubertatea apare odată cu activitatea secretorie a hipotalamusului de LHRH. După ce, în perioada copilăriei, hipotalamusul nu a secretat factori eliberatori de gonadotrofine hipofizare, acesta începe să producă și să elibereze LHRH la vârsta pubertății. Secreția de LHRH nu apare când conexiunile interneuronale dintre hipotalamus și formațiunile nervoase înconjurătoare nu sunt intacte. Deși mecanismul intim al declanșării pubertății nu este deplin lămurit, se pare că este vorba de un proces de maturare a releelor neuronale dintre hipotalamusul secretor al LHRH și nucleii amigdalieni din lobul temporal. Unitatea funcțională

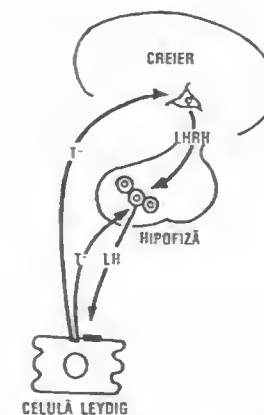


Fig. 13.22. Autoreglarea gonadotrofinelor hipofizare de către hormoni ovarieni. T-, inhibiție testosteronică.

existentă între hipotalamus, hipofiză și celulele Leydig asigură concentrația normală a testosteronului din sânge, cu slabe variații diurne (cu 20–25% mai mari la ora 8 dimineața decât la ora 18 după-amiază). La inhibiția reciprocă dintre gonadotrofinile hipofizare și hormonii testiculari participă în oarecare măsură și estradiolul, ca metabolit tisular al testosteronului.

După 50 de ani, secreția de testosteron scade progresiv, ca urmare a deficitului de LH circulant, determinând uneori fenomene de climacterium la bărbat, asemănătoare cu simptomele de menopauză ale femeii (bufeuri, sufocare, dezechilibre psihice etc.). Acestea beneficiază de tratamentul de substituție cu hormoni testiculari naturali sau de sinteză.

13.4. TIROIDA

Derivată embriologic din canalul tireoglos, glanda tiroidă se găsește la toate vertebratele, îndeplinind un important rol metabolic, de reglare și menținere în limite normale a reacțiilor chimice eliberatoare de energie la nivel celular. La om, tiroida se dezvoltă lateral și inferior cartilajului cricoid, de o parte și de alta a traheei, fiind formată din doi lobi uniți printr-un istm, cu greutate medie de 12–25 g.

Structural, țesutul glandular tiroidian este constituit dintr-un mare număr de foliculi sau acini secretori ai unui lichid vâscos, denumit coloid folicular, de către celulele epiteliale cuboidale ale acestora. Polul apical al celulelor secretoare prezintă vilozități care măresc suprafața de contact cu coloidul. Marginal celulelor foliculare se găsesc celulele parafoliculare, al căror rol endocrin a fost precizat de abia în ultimele decenii.

Pe plan funcțional, s-a constatat că, în starea de inactivitate glandulară, foliculii sunt mari, coloidul este abundent, iar celulele foliculare devin plate. Modificări de sens invers apar în condiții de activitate secretorie intensă a țesutului glandular tiroidian.

Primele indicații asupra rolului posibil endocrin al glandei tiroide provin de la clinicienii care au descris încă din secolul trecut (Basedow, 1840) tulburările caracteristice hiperfuncției tiroidiene de cauză patologică. Din aceeași perioadă datează observațiile clinice privind dezechilibre funcționale și morfogenetice din insuficiența tiroidiană, reproduse de Kocher (1883) la diferite animale cu mixedem experimental după tiroidectomie chirurgicală. Lipsa secreției tiroidiene se însoțește de scăderea metabolismului bazal cu 30–40% sub valorile normale.

Îndepărtarea atât a manifestărilor clinice, cât și a dezechilibrelor metabolice produse de extirparea tiroidei după administrare de extracte tiroidiene a determinat cercetări minuțioase privind factorii hormonal activi din aceste extracte.

Mai întâi, Baumann (1895) a semnalat prezența în concentrații mari a iodului în coloidul tiroidian, sub forma unei combinații iodoproteice, denumită tiroglobulină de către Ostwald (1899). Ulterior, Kendall (1914) izolează principalul hormon tiroidian – tiroxina – prin hidroliza tiroglobulinei, căreia Harrington și Barger (1927) i-au stabilit apoi structura chimică. În 1952, Gross și colab. au identificat în plasma sanguină cel de al doilea hormon tiroidian, triiodotironina.

13.4.1. BIOSINTEZA HORMONILOR TIROIDIENI

Ca produși de secreție ai glandei tiroide, tiroxina (T_4) și triiodotironina (T_3) rezultă din iodarea succesivă a aminoacidului tirozina.

Prima treaptă a formării hormonilor tiroidieni este reprezentată de transferul iodului anorganic din plasmă în interiorul foliculilor și concentrarea sa în coloidul folicular. Fenomenul se realizează prin transport activ, cu participarea ATP și a pompei de iod de la nivelul membranelor bazale celulare ale acinilor glandulari. Concentrația iodului în coloidul folicular este de 30–50 de ori mai mare decât în sânge și poate atinge valori de 250–350 în condițiile iodocaptării maxime. În afara participării la procesul de transport și captare a iodului, celulele tiroidiene sintetizează la nivelul reticulului endoplasmatic și secretă în interiorul foliculului tiroglobulina și enzimele necesare biosintezei de hormoni tiroidieni.

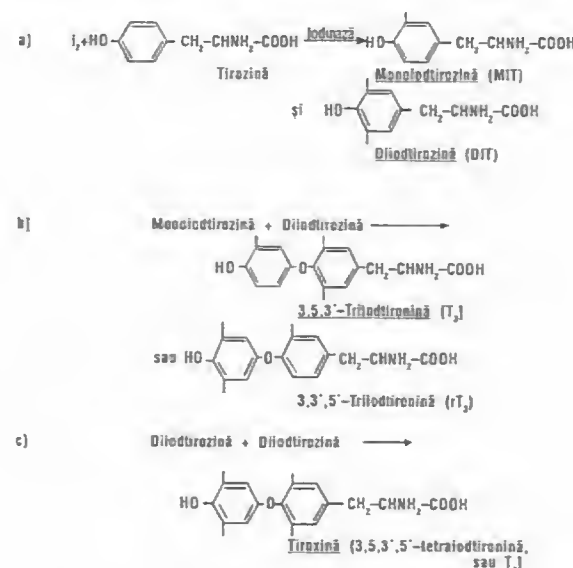


Fig. 13.23. Biosinteza hormonilor tiroidieni.

Tiroglobulina, ca principal constituent al coloidului folicular, este o glicoproteină cu greutate moleculară mare, de 660 000 de daltoni. Fiecare macromoleculă de tiroglobulină conține 25 de molecule de tirozină, principalul substrat al sintezei hormonilor tiroidieni. Biosinteza propriu-zisă se realizează în trepte, prin iodarea succesivă a tirozinei (fig. 13.23).

Sub influența unei iodaze, iodul în prealabil oxidat de către peroxidază se fixează pe nucleul fenolic al tirozinei din tiroglobulină, devenind organic și dând naștere mai întâi monoiodotirozinei și apoi diiodotirozinei. Din cuplarea a două molecule de diiodotirozină, însoțită de pierderea aminoacidului alanina, rezultă tetraiodotironina sau tiroxina.

Prin condensarea unei molecule de monoiodotirozină cu o moleculă de diiodotirozină se formează triiodotironina. Tiroida normală umană conține 23% monoiodotirozină, 33% diiodotirozină, 35% tiroxină și 7% triiodotironină. Un alt compus iodurat prezent însă în cantități infime (sub 1%) în coloidul tiroidian este revers-triiodotironina (rT_3), ca formă inactivă de rezervă a triiodotironinei.

Sinteza normală de hormoni tiroidieni necesită la adult un aport zilnic de 60–100 mg de iod anorganic. Aceste necesități pot fi acoperite prin ingestia de aproximativ 250–300 mg de iod în 24 de ore. Cum doar o treime din iodul ingerat zilnic participă la biosinteza hormonilor tiroidieni, restul se elimină pe cale renală sau se depune în mușchi, oase și piele.

Eliberarea tiroxinei și triiodotironinei din structura complexă a tiroglobulinei se realizează după preluarea acesteia prin pinocitoză de către celulele foliculare, urmată de proteoliză cu ajutorul unor proteinaze lizozomale, în vederea lansării lor în circulație. În timpul digestiei moleculelor de tiroglobulină se eliberează suficiente cantități de mono- și diiodotirozină, care sunt deiodate, permițând iodului rezultat să reintre în ciclul proceselor de biosinteză a hormonilor tiroidieni. O cantitate mică din tiroxina circulantă este de asemenea deiodată, transformându-se în triiodotironină. În timp ce tiroxina reprezintă peste 90% din hormonii tiroidieni circulanți, triiodotironina nu depășește 10%. Eliberarea zilnică este de aproximativ 90 mg de tiroxină și de până la 35 mg de triiodotironină. Deși se eliberează în cantități mai mici, acțiunile metabolice ale triiodotironinei sunt de 3–4 ori mai puternice decât ale tiroxinei la nivelul celulelor țintă, periferice. În

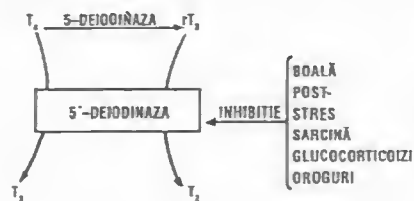


Fig. 13.24. Factorii de inhibare a 5'-deiodinazei.

stres inhibă activitatea 5'-deiodinazei, reducând producerea de T_3 , în favoarea creșterii rT_3 (fig. 13.24).

Transportul celor doi hormoni tiroidieni la țesuturi se face predominant sub formă legată de proteine plasmatice: aproximativ 2/3 se combină cu o globulină (TBG – *thyroxine binding globulin*), 1/4 cu o prealbumină (TBPA) și 1/10 cu o albumină (TBA). Doar 0,03% din T_4 plasmatică și 0,3% din T_3 se găsesc în stare liberă. Afinitatea proteinelor plasmatice este de peste 10 ori mai mare pentru tiroxină decât pentru triiodtironină. De aceea, eliberarea tiroxinei la nivelul țesuturilor este mult mai lentă. Datorită acestui fapt, concentrația tiroxinei din sânge se reduce la jumătate în aproximativ 6,5 zile, în timp ce triiodtironina necesită doar 1,3 zile. Forma legată de proteinele plasmatice asigură rezerve suficiente de hormoni tiroidieni circulanți și totodată evită pierderile pe cale urinară, datorită incapacității sale de a traversa membrana filtrantă glomerulară. Concentrația plasmatică totală și liberă a hormonilor tiroidieni, precum și perioada de înjumătățire a acestora sunt următoarele (tabelul 13.1V).

TABELUL 13.1V

Concentrația hormonilor tiroidieni în sânge
(după Best și Taylor, 1985)

Hormoni tiroidieni	Concentrația medie în ng/ml		Perioada de înjumătățire în zile
	Totală	Liberă	
Tiroxină (T_4)	80	0,03	6,5
Triiodtironină (T_3)	1,2	0,004	1,3
Revers T_3 (rT_3)	0,4	0,00098	0,1

La menținerea concentrației sanguine normale participă atât procesele de biosinteză și eliberare, cât și reacțiile enzimatice de inactivare și eliminare.

Inactivarea hormonilor tiroidieni se realizează prin deiodări succesive urmate de dezaminări ale lanțului lateral și conjugarea cu un glucuronid sau sulfat în vederea eliminării lor urinare. Glucurononconjugarea are loc în ficat, iar sulfoconjugarea se produce în rinichi. Prin transaminare sau dezaminare oxidativă se obțin analogi piruvici corespunzători iodtiroinelor, care sunt apoi transformați prin decarboxilare în derivați acei ai acestora, de tipul acizilor 3,5,3',5'-tetraiodtiroacetic (TETRAC) sau 3,5,3'-triiodtiroacetic (TRIAC). Aceștia ar constitui, după unii autori, forme imediate active la nivelul receptorilor celulari, deși activitatea lor biologică nu depășește 20% din cea a tiroxinei.

13.4.2. ACȚIUNILE BIOLOGICE ALE HORMONILOR TIROIDIENI

Efectele biologice multiple ale hormonilor tiroidieni an la bază două acțiuni principale: intensificarea reacțiilor metabolice și stimularea proceselor de creștere și dezvoltare la copil. Latența și durata diferită a acestora se datorește particularităților secreției, transportului și inactivării hormonilor respectivi. În cazul tiroxinei, de exemplu, efectele metabolice specifice apar după o perioadă de latență de 2–3 zile și durează 4–6 săptămâni, atingând valori maxime după 10–12 zile de la administrare. Acțiunile triiodtironinei sunt

mai prompte, dar de mai scurtă durată. Ele apar după 6–12 ore și devin maxime în următoarele 2–3 zile. Spre deosebire de iodtiroine (T_3 și T_4), tirozinele iodate (MIT și DIT) sunt, ca și rT_3 , inactive. Cele două iodtiroine produc efecte identice, deși T_3 este hormonul tiroidian cu cea mai înaltă activitate biologică, iar efectele tiroxinei depind în mare măsură de conversiunea intracelulară a acesteia în triiodtironină.

Pe plan metabolic, hormonii tiroidieni cresc consumul de oxigen și metabolismul energetic al tuturor țesuturilor și organelor, excepție făcând doar creierul, splina, plămânii, retina și gonadele. Ca urmare a intensificării reacțiilor oxidative celulare, metabolismul bazal poate crește cu 60–100% peste valorile normale ori de câte ori secreția tiroidiană este în exces. La animalul tireoprov sau subiectul mixedematos, metabolismul bazal scade până la –35%, iar administrarea de tiroxină îl readuce la normal. La subiecții normali, efectul hipermetabolizant al tiroxinei este proporțional cu doza administrată. Întrucât la homeoterme aproape 40% din producția de căldură este sub controlul tiroidian, paralel cu activarea reacțiilor oxidoreductoare celulare și creșterea metabolismului bazal, hormonii tiroidieni intensifică procesele termogenetice. Efectele calorigene ale acestora, atribuite inițial decuplării fosforilărilor oxidative, se datorează activării Na^+ , K^+ -ATPazei membranare (Smith și Edelman, 1979) și transportului cuplat al ionilor de Na și K cu al glucizei și aminoacizilor în vederea formării și utilizării crescute de ATP, ca principal substrat energetic celular.

Paralel cu activarea transportului membranar, hormonii tiroidieni accelerează degradarea nutrienților la nivel mitocondrial, în scopul eliberării de energie, inclusiv calorică.

Metabolismul proteic este afectat de hormonii tiroidieni atât în sensul intensificării proceselor catabolice de degradare și uzură, cât și al celor anabolice, de sinteză, creștere și dezvoltare. Când tiroxina sau triiodtironina sunt administrate experimental, sinteza proteică apare crescută la nivelul tuturor țesuturilor. Într-un prim moment este stimulat procesul de translație de la nivelul ADN nuclear, ca urmare a creșterii activității polimerazelor I și II ale ARN în prezența complexului hormon-receptor. Cea de a doua etapă, de transcripție, apare ulterior, după ore sau zile, și este cauzată de sinteza crescută a ARN la nivelul genelor. Această este urmată de creșterea generalizată a sintezei de proteine celulare.

Stimularea genelor se realizează prin combinarea triiodtironinei rezultate din deiodinarea tiroxinei în celulă cu o proteină receptoare de la nivelul nucleului celular, care, la rândul său, duce la activarea formării de ARN mesager și proteine ribozomale.

Un loc important revine sinizei de protein-enzime.

După aproximativ o săptămână de la administrarea hormonilor tiroidieni, peste 100 de enzime intracelulare apar crescute. Ca exemplu poate fi dată alfa-glicerofosfat dehidrogenaza, enzimă glicolitică a cărei activitate este de peste 6 ori mai mare, contribuind la degradarea rapidă a hidrocarbonatelor sub influența tiroxinei. Enzimele oxidative mitocondriale sunt, de asemenea, crescute și mult mai active. În general, mitocondriile din majoritatea celulelor organismului cresc în mărime și în număr, în vederea formării unor cantități mai mari de ATP și energizării în felul acesta a funcțiilor celulare.

Concentrațiile mari de hormoni tiroidieni determină însă creșterea exagerată și nmflarea mitocondriilor, urmată de decuplarea reacțiilor de fosforilare oxidativă și producerea unor mari cantități de căldură, dar cu puțin ATP.

În afara metabolismelor proteic și glucidic, hormonii tiroidieni afectează substanțial mobilizarea și metabolizarea lipidelor. Constituind principala sursă de energie, depunerile de grăsime ale organismului sunt într-o măsură mai mare folosite ca substrat energetic decât celelalte elemente tisulare. Mobilizarea lipidelor din țesutul gras este întregită de creșterea acizilor grași liberi în plasmă și de accelerarea oxidării lor la nivel celular. Concomitent, hormonii tiroidieni scad conținutul în colesterol, fosfolipide și trigliceride al sângelui. Fenomene inverse, de creștere a lipidelor sanguine apar în cazurile de hipotiroidie, asociate adeseori cu manifestări clinice de tip aterosclerotic.

Acțiunea hipermetabolizantă exercitată asupra celor trei metabolisme de către hormonii tiroidieni se traduce nu numai prin creșterea metabolismului bazal și a temperaturii corporale, ci se însoțește de scădere în greutate. Fenomene inverse, de creștere a greutății corporale, apar în hipotiroidii ca urmare a retenției de apă și acumulării de lipide nemetabolizate.

Cea de a doua categorie de efecte biologice ale hormonilor tiroidieni este reprezentată de stimularea creșterii și maturării. Edificator din acest punct de vedere este exemplul mormolocilor, a căror metamorfoză apare accelerată și intens activată. La om și alte mamifere, hormonii tiroidieni stimulează osificarea

encondrală, creșterea liniară și maturarea centrilor de creștere epifizară din oase în perioada copilăriei. La hipotiroidieni, ritmul de creștere este, dimpotrivă, mult încetinit. Erupția și creșterea dinților sunt, de asemenea, stimulate de prezența hormonilor tiroidieni. Aceștia dețin un rol important în creșterea și dezvoltarea normală a sistemului nervos central atât în timpul vieții fetale, cât și în primii ani de viață postnatală. Procesele de mielinizare și ramificare neuronală (axonală și dendritică) sunt profund influențate de excesul sau deficitul secretor de hormoni tiroidieni. Glanda tiroidă începând să funcționeze la om din luna a patra de viață uterină, secreția sa intervine în maturarea anumitor centri nervoși și cerebralizare în general. Hipotiroidia instalată în timpul dezvoltării sistemului nervos determină reducerea numărului de neuroni și terminații neuronale, precum și încetinirea procesului de mielinizare. Pe plan neuro-psihic se instalează fenomene de întârziere mentală de diferite grade, ajunse adeseori până la stadiul de cretinism ireversibil. Efectele hiperfuncționale tiroidiene sau ale administrării exogene de tiroxină asupra sistemului nervos sunt reprezentate de creșterea excitabilității, emotivității și capacității de răspuns, ideatie și învățare, hiperreflexie cu scurtarea perioadei de latență, nervozitate, tremor, anxietate și insomnii.

Hiperexcitabilitatea nervoasă interesează ambele componente ale sistemului nervos, intensificând nu numai activitatea somato-psihică, ci și reflectivitatea neuro-vegetativă, cu răsunetul corespunzător asupra diverselor organe efectoare. Un rol important revine sinergismului dintre hormonii tiroidieni și sistemul nervos simpatic. Unele efecte metabolice ale T_4 și, mai ales, ale T_3 , cum sunt creșterea metabolismului bazal, glicoliza, lipoliza și producerea de căldură, se întâlnesc și în cazul catecolaminelor simpatico-adrenale. Hormonii tiroidieni, deși nu influențează conținutul în adrenalină și noradrenalină al plasmii sau urinei, cresc nivelul cAMP, mesagerul biochimic clasic de ordinul doi al catecolaminelor. Pe această bază s-a făcut presupunerea că T_4 și T_3 măresc reactivitatea tisulară la catecolaminele circulante, activatoare ale sistemului adenilat ciclază-cAMP.

Interacțiunea dintre hormonii tiroidieni și sistemul nervos simpatic pare a fi mai complexă, întrucât aceștia cresc și numărul de receptori beta-adrenergici în inimă și vase, iar blocantele adrenergice reduc manifestările cardio-vasculare la hipertiroidieni (Berne și Levy, 1983). Printr-un astfel de mecanism complex, ritmul și debitul cardiac sunt crescute, în timp ce forța de contracție a inimii scade progresiv, ca urmare a catabolismului proteic exagerat, ducând la decompensare și insuficiența cardiacă din tireotoxicoză. La rândul său, fluxul sanguin tisular crește sub influența produșilor de intensă degradare metabolică, mai ales la nivelul pielii, pentru a satisface necesitățile crescute ale eliminării excesului de căldură prin iradiere, sudare și evaporare. Presiunea sanguină generală prezintă creșteri moderate și limitate, în majoritatea cazurilor, la presiunea sistolică. Ritmul și amplitudinea respirației apar însă constant activate, ca urmare a intensificării consumului de oxigen și formării bioxidului de carbon de către hormonii tiroidieni. La nivelul tractului gastro-intestinal, aceștia stimulează atât ingestia de alimente și secreția sucurilor digestive, cât și motilitatea intestinală, determinând binecunoscuta hiperfagie și diaree a hipertiroidienilor.

Fluxul plasmatic renal, filtrarea glomerulară și transportul tubular maxim pentru glucoză, creatină și alte substanțe apar crescute în prezența hormonilor tiroidieni.

La rândul său, secreția unor glande endocrine este profund influențată de hormonii tiroidieni. Este cazul secreției crescute atât de insulină și glucocorticoizi, cât și de hormon paratiroidian, ca urmare a efectelor produse de hormonii tiroidieni asupra metabolismelor glucidice, proteidice și fosfo-calcice. Acțiunile catecolaminelor, glucagonului, cortizolului și hormonului de creștere sunt potențate. Un rol important dețin hormonii tiroidieni și în reglarea funcției de reproducere atât la bărbat, cât și la femeie. Lipsa acestora provoacă la bărbat dispariția libidoului, iar excesul lor se însoțește frecvent de impotență. La femei apare dismenoree cu metroragii, în caz de deficit secretor tiroidian, și oligomenoree sau chiar amenoree, în hipertiroidii. Aceste efecte nu sunt specifice, ci rezultă din acțiunile metabolice directe și indirecte hipofizare, de reglare și control al funcțiilor gonadale.

Metabolismul vitaminelor lipo- și hidrosolubile este, de asemenea, afectat de hormonii tiroidieni, ca urmare a intensificării proceselor metabolice și a creșterii nevoilor de coenzime celulare. În hipertiroidism, de exemplu, se consumă atât cantități mai mari de vitamine liposolubile (A, D, E), cât și hidrosolubile (tiamină, riboflavină, B_{12} , C etc.).

Mecanismul de acțiune al hormonilor tiroidieni este intracelular și are la bază, după cum s-a văzut, intensificarea proceselor metabolice nucleare și ribozomale, pe de o parte, și mitocondriale, pe de altă parte. La nivelul receptorilor nucleari, T_3 , rezultată în mare parte din conversia lui T_4 , prezintă o afinitate de legare

de aproximativ 20 de ori mai mare decât a produsului de bază. Complexul hormon-receptor accelerează transcripția și translația sintezei de protein-enzime nucleare și ribozomale, de tipul polimerazelor și fosfoprotein kinazelor, urmată de cea a enzimelor oxido-reductoare mitocondriale (NADPH, citocrom oxidaza, citocrom C reductaza, malic dehidrogenaza, succin dehidrogenaza, alfa-glicerofosfat dehidrogenaza etc.), cu consecințele metabolice și funcționale menționate. În cazul stimulării proceselor de creștere prin mecanismul activării sintezei de proteine, s-a stabilit că T_3 intensifică producerea unui ARN specific bormonului de creștere și că însăși eliberarea acestuia de la nivelul celulelor secretoare hipofizare este activată de hormonii tiroidieni (Berne și Levy, 1983). În lipsa acestora, unele gene nu răspund la inductorul principal, hormonul de creștere. În plus, hormonii tiroidieni controlează sinteza altor receptori bormonali și acționează sinergic cu bormonul de creștere asupra producerii de somatomedine și bipreplaziei condrocitelor. În felul acesta, acțiunea complexă a bormonilor tiroidieni contribuie substanțial la reglarea creșterii, diferențierii și maturizării țesuturilor și organismului, realizând dezvoltarea normală programată de codul genetic.

La rândul lor, efectele hipermetabolizante generatoare de energie, inclusiv calorică, se produc prin mecanismul intensificării reacțiilor oxido-reductoare mitocondriale cu consum crescut de oxigen și substanțe energogene de tipul glucidelor, lipidelor și vitaminelor. La realizarea acestora participă întregul organism, începând cu marile funcții (cardio-vasculară, respiratorie și digestivă) și sfârșind cu echipamentul enzimatic nuclear și mitocondrial.

Intensificând biosinteza de protein-enzime oxido-reductoare la nivel mitocondrial, triiodtironina crește consumul de oxigen și substraturi pentru oxidare de către enzimele respective. Pentru a asigura aportul crescut la nivel celular de O_2 și substraturi de origine alimentară conținătoare de energie potențială, hormonii tiroidieni activează ventilația pulmonară, ingestia de alimente și mobilizarea de glucide, lipide sau proteine, în vederea transportării lor pe cale sanguină și a utilizării ca substrat energetic.

În funcție de conținutul în hormoni tiroidieni circulanți, consumul de O_2 scade la om de la valoarea normală de 250 ml/min la eutiroidieni, până la 150 ml/min în cazul bipotiroidienilor sau crește până la 400 ml/min la hipertiroidieni, determinând variații ale metabolismului bazal între -40% și +80%.

13.4.3. REGLAREA SECREȚIEI HORMONILOR TIROIDIIENI

Adaptarea secreției tiroidiene la necesitățile metabolice variabile ale organismului se realizează pe cale neurohormonală cu participarea complexului hipotalamo-hipofizar, pe de o parte, și a bormonilor tiroidieni circulanți, pe de alta. Rolul principal revine hormonului tireotrop adenohipofizar, denumit tireotrofină (TSH), de natură glicoproteică și cu greutate moleculară de 28 000 daltoni. În timp ce hipofizectomia este urmată de atrofierea glandei tiroide și aplatizarea epiteliului folicular, administrarea TSH intensifică producerea și secreția hormonilor tiroidieni.

Tireotrofina hipofizară activează captarea iodului în celulele glandulare și sinteza iodtironinelor, intervenind în toate etapele biosintezei, și, totodată, stimulează proteoliza tiroglobulinei și lansarea T_3 și T_4 în circulație. În plus, TSH intensifică creșterea numărului de celule tiroidiene, volumului glandular și activității secretorii a acestora. Astfel, TSH stimulează toate formele de activitate a celulelor glandulare tiroidiene. În comparație cu proteoliza tiroglobulinei și eliberarea hormonilor în sânge, care se produc în primele 30 de minute, celelalte efecte necesită ore sau chiar zile.

Acțiunile multiple ale TSH hipofizar asupra celulelor secretoare tiroidiene se realizează prin mecanismul activării sistemului adenilat ciclază-cAMP, cu participarea receptorilor membranari de la nivelul suprafeței celulelor foliculare. cAMP rezultat, acționând ca mesager intracelular de ordinul al II-lea, intensifică biosinteza și activitatea principalelor enzime celulare tiroidiene, secreția bormonală și creșterea țesutului glandular.

La rândul său, secreția de TSH hipofizar este sub controlul neurobormonului hipotalamic TRH (hormon eliberator de tireotrofină) sau tireoliberină. Acesta este un tripeptid cu structura piroglutamyl-histidilprolină, secretat de terminațiile nervoase ale eminenței mediane și transportat la hipofiza anterioară pe calea sanguină a sistemului port hipotalamo-hipofizar. Blocarea sa reduce, nu suprimă, secreția de TSH. Efecte inhibitoare, secundare asupra secreției de TSH exercită somatostatina, concomitent cu inhibarea lansării în circulație a hormonului de creștere.

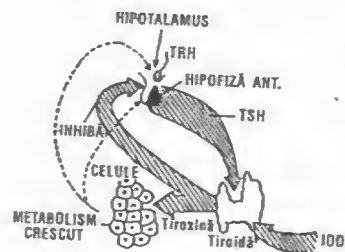


Fig. 13.25. Autoreglarea secreției de hormoni tiroidieni.

Unul din principalii factori neurogeni de stimulare a secreției de TSH cu participarea TRH hipotalamic îl constituie frigul. Expunerea la frig crește consumul de oxigen și metabolismul bazal atât la animalele homeoterme, cât și la om. Reacțiile psiho-emoționale afectează de asemenea secreția de TSH și TRH, concomitent cu fenomenele de predominanță simpatică generalizată. Dispariția acestor reacții după secționarea tijei hipofizare demonstrează că atât frigul, cât și stările emoționale acționează asupra hipofizei prin intermediul releului hipotalamic.

În afară de TRH, un rol important în autoreglarea secreției tiroidiene revine T_3 și T_4 din sângele circulant.

Creșterea acestora în sânge sau LCR determină scăderea până la dispariția a secreției de TSH.

În afară de TRH, un rol important în autoreglarea secreției tiroidiene revine T_3 și T_4 din sângele circulant.

Creșterea acestora în sânge sau LCR determină scăderea până la dispariția a secreției de TSH.

În afară de TRH, un rol important în autoreglarea secreției tiroidiene revine T_3 și T_4 din sângele circulant.

Creșterea acestora în sânge sau LCR determină scăderea până la dispariția a secreției de TSH.

În afară de TRH, un rol important în autoreglarea secreției tiroidiene revine T_3 și T_4 din sângele circulant.

Creșterea acestora în sânge sau LCR determină scăderea până la dispariția a secreției de TSH.

În afară de TRH, un rol important în autoreglarea secreției tiroidiene revine T_3 și T_4 din sângele circulant.

Creșterea acestora în sânge sau LCR determină scăderea până la dispariția a secreției de TSH.

În afară de TRH, un rol important în autoreglarea secreției tiroidiene revine T_3 și T_4 din sângele circulant.

Creșterea acestora în sânge sau LCR determină scăderea până la dispariția a secreției de TSH.

În afară de TRH, un rol important în autoreglarea secreției tiroidiene revine T_3 și T_4 din sângele circulant.

Creșterea acestora în sânge sau LCR determină scăderea până la dispariția a secreției de TSH.

În afară de TRH, un rol important în autoreglarea secreției tiroidiene revine T_3 și T_4 din sângele circulant.

Creșterea acestora în sânge sau LCR determină scăderea până la dispariția a secreției de TSH.

În afară de TRH, un rol important în autoreglarea secreției tiroidiene revine T_3 și T_4 din sângele circulant.

Creșterea acestora în sânge sau LCR determină scăderea până la dispariția a secreției de TSH.

În afară de TRH, un rol important în autoreglarea secreției tiroidiene revine T_3 și T_4 din sângele circulant.

Creșterea acestora în sânge sau LCR determină scăderea până la dispariția a secreției de TSH.

În afară de TRH, un rol important în autoreglarea secreției tiroidiene revine T_3 și T_4 din sângele circulant.

Creșterea acestora în sânge sau LCR determină scăderea până la dispariția a secreției de TSH.

În afară de TRH, un rol important în autoreglarea secreției tiroidiene revine T_3 și T_4 din sângele circulant.

Creșterea acestora în sânge sau LCR determină scăderea până la dispariția a secreției de TSH.

În afară de TRH, un rol important în autoreglarea secreției tiroidiene revine T_3 și T_4 din sângele circulant.

Creșterea acestora în sânge sau LCR determină scăderea până la dispariția a secreției de TSH.

În afară de TRH, un rol important în autoreglarea secreției tiroidiene revine T_3 și T_4 din sângele circulant.

Creșterea acestora în sânge sau LCR determină scăderea până la dispariția a secreției de TSH.

În afară de TRH, un rol important în autoreglarea secreției tiroidiene revine T_3 și T_4 din sângele circulant.

Creșterea acestora în sânge sau LCR determină scăderea până la dispariția a secreției de TSH.

În afară de TRH, un rol important în autoreglarea secreției tiroidiene revine T_3 și T_4 din sângele circulant.

Creșterea acestora în sânge sau LCR determină scăderea până la dispariția a secreției de TSH.

În afară de TRH, un rol important în autoreglarea secreției tiroidiene revine T_3 și T_4 din sângele circulant.

Creșterea acestora în sânge sau LCR determină scăderea până la dispariția a secreției de TSH.

În afară de TRH, un rol important în autoreglarea secreției tiroidiene revine T_3 și T_4 din sângele circulant.

Creșterea acestora în sânge sau LCR determină scăderea până la dispariția a secreției de TSH.

În afară de TRH, un rol important în autoreglarea secreției tiroidiene revine T_3 și T_4 din sângele circulant.

13.5. PANCREASUL ENDOCRIN

În afara secreției acinoase exocrine, reprezentată de fermenții pancreatici indispensabili digestiei intestinale (tripsină, amilază, lipază), pancreasul îndeplinește un important rol endocrin. Dualitatea sa funcțională a fost stabilită în a doua jumătate a secolului al XIX-lea, la scurt timp după ce Lancereaux (1877) a semnalat prezența unor leziuni pancreatice la pacienții cu boala zahărului. Pornind de la această observație, Mehring și Minkowski (1889) realizează la câine un tablou clinic și umoral similar cu cel din diabetul zaharat uman prin pancreatectomie parțială sau totală. La rândul său, Laguesse (1893) aduce argumente morfologice în favoarea participării insulelor Langerhans (1869) la producerea secreției endocrine pancreatice, pe care Meyer o denumește sugestiv *insulină*, cu mult înainte de a fi fost izolată. Extragerea și izolarea sa din pancreasul de bovine au fost realizate în 1922 de către Collip, Banting, Best și MacLeod la câteva luni după ce Paulescu (1921) i-a semnalat prezența în extractele pancreatice, denumind-o *pancreină*. În 1926, Abel și colab. au obținut-o sub formă cristalină, în 1955 Langer a stabilit structura chimică a acesteia, iar în 1966 Kung Yueh-Ting a realizat prima insulină sintetică.

Problema rolului endocrin al pancreasului s-a complicat însă din 1930 încolo, când Burger (1930-1935) atrage atenția asupra factorului hiperglicemiant pancreatic denumit *glucagon*, sau HGF (*hyperglycemic-glycogenolytic factor*). Cercetările care au urmat, precizând acțiunea antagonistă față de insulină a acestuia, au întregit tabloul participării pancreatice la reglarea hormonală a echilibrului glicemic.

Țesutul glandular pancreatic este constituit din acini secretori de sucuri digestive în duoden și din insulele Langerhans.

Ca structuri secretoare de hormoni pancreatici, insulele Langerhans, în număr de 20-30 de insule/mm³, însumează aproximativ 1 milion, reprezentând doar 1-2%, din greutatea întregului pancreas. Ele conțin șase tipuri de celule, concepute în regiunea capului pancreatic, din care primele patru (alfa, beta, gamma și delta) asigură funcția endocrină a pancreasului.

Celulele alfa, voluminoase, coostituie 20-25% din totalul insulelor și sunt sediul proceselor de secreție a glucagonului.

Celulele beta sunt mai mici, dar mai numeroase (65% din insule), și secretă insulină. În timp ce granulele alfa sunt insolubile în alcool, conținutul granular al celulelor beta se solubilizează cu ușurință în soluțiile hidroalcoolice. Primele sunt distruse de cobalt, iar cele aparținând tipului beta sunt degradate ireversibil de aloxan și streptozotocin. Diabetul aloxanic este de altfel frecvent utilizat ca model experimental în cercetările de diabetologie.

La rândul lor, celulele delta negranulate par a îndeplini rol de elemente secretoare de somatostatine.

Dintre celelalte tipuri de celule, care nu depășesc 5%, celulele gamma conțin urme de gastrină, iar celulele PP secretă polipeptidul pancreatic (PP).

Diabetul experimental realizat prin extirparea pancreasului se însoțește de profunde dereglări metabolice reprezentate de hiperglicemie, glicozurie, hiperazotemie, hiperlipemie, cetoemie, slăbire pronunțată, scăderea pH-ului și a rezervei alcalice, dereglări ce se întâlnesc la majoritatea diabeticii. Extractele pancreatice, ca și tratamentul de substituție cu insulina amendează dezechilibrele umorale și nutriționale create de perturbarea metabolismelor glucidic, lipidic și proteic în lipsa insulelor Langerhans.

13.5.1. INSULINA

Insulina își datorează numele originii sale anatomice, insulare. Ea este un polipeptid, format din 51 de aminoacizi, dispuși în două lanțuri peptidice, unite prin două punți disulfidice. Lanțul peptidic A conține 21 de aminoacizi, din care două molecule de cisteină reunite între ele printr-o punte -S-S-. Lanțul peptidic B este constituit din 30 de aminoacizi, cu câte o moleculă de cisteină în pozițiile 7 și 19 (fig. 13.26).

Cele două lanțuri sunt legate prin punțile disulfidice de la nivelul lui A₆-B₇ și A₂₀-B₁₉. Ruptura acestor punți duce la dispariția acțiunilor metabolice ale insulinei. Greutatea sa moleculară de ansamblu este

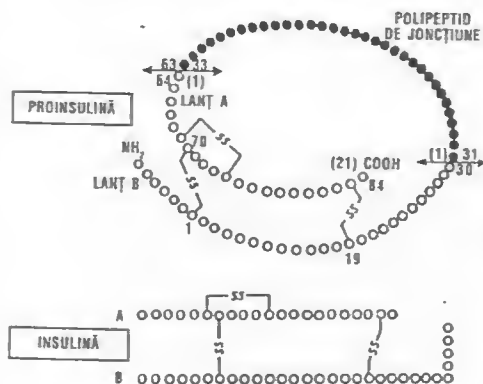


Fig. 13.26. Structura polipeptidică a insulinei.

realizează prin ruperea punților disulfidice cu ajutorul unei insulినaze hepatice, renale sau musculare, care reduce la jumătate activitatea insulinei circulante în aproximativ 10-15 min.

Metode de dozare. Dozarea insulinei din sânge se poate face fie cu metode biologice, fie radioimunologice. Primele obiectivează prezența acesteia prin acțiunile metabolice pe care le exercită asupra unor preparate biologice adecvate ca: efectul hipoglicemicant pe șobolanul cu diabet aloxanic, hipofizectomizat și suprarenalectomizat; captarea și utilizarea glucozei de către diafragmul sau țesutul adipos periedimar de șobolan etc.

Spre deosebire de metodele biologice, care permit identificarea unor concentrații mari, de 10-100 de microunități de insulină/ml, tehnicile radioimunologice sunt mai sensibile, decelând cantități mici, de sub o microunitate pe ml. La baza determinării radioimunologice a insulinei stau proprietățile sale antigenice semnalate de Berson și Yalow (1956). Plasma diabeticilor tratați cu insulină de porc conține anticorpi anti-insulinici, ce pot fi saturați cu hormonul radioactiv, al cărui grad de dislocare de către insulina prezentă în plasma cercetată permite stabilirea concentrației sale în proba respectivă. Pe același principiu se bazează de altfel dozarea tuturor hormonilor cu structură peptidică, prevăzuți cu proprietăți antigenice. Cantitatea de insulină necesară scăderii glicemiei la 0,45 g/l la iepurele de 2 kg în inaniție de 24 de ore poartă numele de unitate fiziologică. Unitatea clinică reprezintă 1/3 din unitatea fiziologică. Etalonul internațional de insulină conține 24 U/mg de substanță activă.

Acțiunile insulinei se adresează în primul rând metabolismului glucidic. La câteva minute după administrarea intravenoasă a acesteia se produce o scădere brutală a concentrației glucozei din sânge. Efectele hipoglicemice ale insulinei se datoresc creșterii consumului de glucoză la nivel celular, pe de o parte, și intensificării procesului de transformare și depozitare în țesuturi sub formă polimerizată de glicogen, pe de altă parte. Țesutul muscular și ficatul, ca principale organe de depozit, conțin în primul caz 200-300 g de glicogen, iar în cel de al doilea între 100 și 150 g.

Captarea și utilizarea glucozei de către mușchiul izolat cresc în prezența insulinei. Mai dificil de pus în evidență este acțiunea directă a acesteia la nivelul ficatului. La animalul pancreatectomizat, rezervele hepatice de glicogen scad chiar în condițiile hiperglicemiei. Adaosul de insulină restabilește conținutul în glicogen al ficatului, reducând debitul hepatic al glucozei (ficatul eliberează mai puțină glucoză decât primește). Intensificarea glicogenopexiei musculare și hepatice, dublată de catabolismul crescut al glucozei la nivelul celorlalte țesuturi, contribuie la realizarea hipoglicemiei insulinice.

În prezența insulinei, aproximativ o treime din glucidele alimentare sunt convertite în lipide (acizi grași și glicerol) prin intermediul plăcii tumante a metabolismului intermediar reprezentate de acil coenzima A. Cupele de ficat provenind de la șobolanii diabetici nu încorporează acetatul în lanțul acizilor

de aproape 6 000, mai exact 5 734. În soluții, insulina formează cu ioni metalici agregate moleculare cu greutate moleculară mai mare (12 000 sau chiar 36 000) și cu resorbție mai lentă.

In vivo, celulele beta-insulare sintetizează hormonul activ dintr-un precursor denumit proinsulină, cu greutate moleculară de 9 000, constituit din 84 de aminoacizi. Sub influența unei proteaze celulare specifice de tip tripsinic sau kaliceinic, aceasta este clivată la două niveluri, eliberând lanțurile A și B ale insulinei și un polipeptid C de jonctiune, inactiv, format din 33 de aminoacizi. Mici diferențe în secvența aminoacizilor din structura proteică a insulinei pot apărea de la o specie la alta fără afectarea acțiunilor sale hormonale. Singurul risc îl constituie proprietățile antigenice, producătoare de anticorpi specifici inactivanți ai insulinei injectate. În condiții normale, inactivarea se

grași. Adaosul de insulină stimulează sinteza acestora *in vitro*, crescând câțul respirator ca urmare a utilizării glucozei la sinteza de lipide. Paralel cu intensificarea consumului de glucide, insulina reduce utilizarea lipidelor, favorizând nu numai sinteza, ci și depozitarea lor în celulele adipose sub formă de trigliceride. La nivelul adipocitelor, insulina activează transportul de glucoză și lipogeneza în același mod ca la nivelul ficatului și, totodată, inhibă acțiunea lipazei implicate în transformarea trigliceridelor în acizi grași liberi circulanți.

În lipsa insulinei și a metabolizării normale a glucozei la diabetici se produce intensificarea compensatoare a consumului de lipide, ca urmare a dezinhibării lipazei respective. Catabolizarea exagerată a lipidelor prin beta-oxidare favorizează sinteza de tipul acizilor acetoacetic și beta-hidroxibutiric, prezenți în cantități crescute în sângele diabeticilor.

Administrarea insulinei, restabilind metabolismul glucidic, acționează indirect asupra catabolismului lipidic, în sensul frânării sale și activării proceselor de biosinteză a acizilor grași pe seama consumului crescut de glucoză. De aici, utilizarea insulinei în cura de îngrășare și denumirea ei de hormon al abundenței (depunerii de energie).

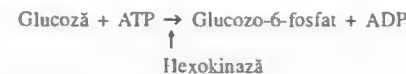
Paralel cu efectele hipoglicemice și de activare a formării de lipide, insulina afectează substanțial și metabolismul proteic. În acest sens pledează atât proteoliza exagerată de la diabetici, cât și stimularea sintezei proteice de către insulină. Dispariția metioninei marcate din plasma diabeticilor se face mai lent decât la normali, iar insulina activează captarea acesteia de către țesutul muscular. Acțiunea insulinei asupra sintezei proteice ridică problema rolului său eventual în creștere. Între hormonul somatotrop și insulină există o sinergie funcțională, realizată de efectele cumulative asupra anabolismului proteic și creșterii staturilor ponderale.

Activând atât procesele de stocare a glucozei sub formă de glicogen, cât și de sinteză a lipidelor și proteinelor pe seama glucidelor alimentare, insulina deține, alături de alți hormoni anabolizanți un important rol fiziologic în creșterea rezervelor energetice potențiale, pe care organismul le va putea utiliza în funcție de necesități, în scop plastic, energetic sau funcțional.

Mecanismul de acțiune al insulinei asupra celor trei metabolisme este complex și diferă de la un țesut la altul. Dintre numeroasele teorii emise, două au intrat în literatură pe baza unui număr mare de date experimentale.

Prima pune efectele metabolice ale insulinei pe seama acțiunii sale asupra activității hexokinazei, iar cea de-a doua le atribuie creșterii permeabilității celulare.

Teoria hexokinazei, emisă de Cori (1945-1950), postulează că insulina intervine în faza inițială a metabolismului glucozei, de formare a glucozo-6-fosfatului cu participarea hexokinazei. Reacția pe care ar favoriza-o insulina ar fi următoarea:



În favoarea afectării specifice a degradării glucozei pledează faptul că animalul diabetic metabolizează fructoza, lactatul sau piruvatul, dar nu și glucoza. Fenomenul apare și *in vitro* pe secțiuni de ficat provenite de la animale diabetice.

Interacțiunea dintre insulină și hexokinază nu pare a fi directă, ci mediată de o antihexokinază, ale cărei proprietăți inhibitoare ar fi blocate în prezența hormonului pancreatic. Îndepărtarea activității antihexokinazei sanguine ar face posibilă activarea metabolizării glucozei de către hexokinază.

Teoria permeabilității membranare, elaborată de Levine (1949-1950), susține că principala acțiune a insulinei constă în creșterea permeabilității celulare la glucoză. Debitul de captare și utilizare a glucozei de către diferite tipuri de celule apare crescut sub influența insulinei atât *in vivo*, cât și *in vitro*.

În timp ce unii autori presupun existența unui mesager intracelular specific insulinei, alții admit participarea cAMP ca principal mediator biochimic al acțiunilor sale anabolizante. Într-adevăr, în afara creșterii concentrației glucozei intracelulare pentru glicogenoză și lipogenoză, insulina provoacă și scăderea cAMP din celulă. Creșterea acestuia pare a fi mai mult sau mai puțin specifică hormonilor catabolizanți (glucagon, adrenalină, ACTH etc.). Inhibarea sa de către insulină ar comuta metabolismul celular de tip

catabolic spre reacții anabolice de sinteză și stocaj. O mare parte din acțiunile insulinei se produc însă în absența modificărilor cAMP.

Efectele membranare și enzimatic „de profunzime” ale insulinei se completează, realizând răspunsul unitar al celulei. Cele două teorii, punând accentul pe unul sau altul din efectele insulinei la nivel celular, de fapt se întregesc. Permeabilitatea membranei pentru glucoză, rezultată din contactul insulinei cu receptorul membranal, este urmată de activarea oxidării și utilizării sale în procesele de glicogenoză, lipogeneză și sinteză proteică, cu ajutorul unui echipament enzimatic diferențiat. Hexokinaza și adenilat ciclaza membranală implicate în sinteza de cAMP sunt doar două din numeroasele enzime interesate în acțiunea hipoglicemiantă a insulinei. Captarea și stocarea glucozei în ficat, de exemplu, presupune inhibarea glicogen fosforilazei și activarea fosfofructokinazei și glicogen sintetazei de către insulină. La nivelul mușchilor, insulina facilitează transportul glucozei cu ajutorul unei proteine transportoare (*carrier*) prin mecanismul difuziunii activate. Prin mecanisme similare se realizează captarea și utilizarea glucozei la nivelul altor țesuturi și organe. Într-un prim moment, insulina se combină cu o proteină receptoare, cu greutate moleculară de aproximativ 340 000, care activează sistemul de transport membranal și echipamentul enzimatic necesar degradării glucozei la nivel celular. Receptorul insulinic este o proteină complexă, formată dintr-un tetramer, cu două subunități glicoproteice – alfa – și alte două subunități – beta –, unite prin punți disulfidice.

Subunitățile alfa sunt extracelulare, iar cele beta sunt transmembranare, cu activitate tirozin kinazică. Prin autofosforilarea receptorului se realizează internalizarea insulinei pentru a-și exercita efectele celulare. Excepție face doar creierul, care este permeabil la glucoză fără participarea insulinei. Glucoza fiind principalul substrat energetic al celulelor nervoase, scăderea sa în sânge la valori sub 50 mg/dl provoacă amețeli, convulsii sau chiar comă hipoglicemică.

Reglarea secreției de insulină. Excitantul fiziologic al secreției de insulină fiind concentrația glucozei sanguine, creșterea acesteia peste valorile normale de 1–1,1 g/l determină stimularea insulinoscreției în două faze. Prima fază apare la 3–5 min după instalarea hiperglicemiei, realizând o insulinoscreție de aproximativ 7–10 ori mai mare față de secreția bazală. Aceasta are tendința la scădere în următoarele 5–10 min, după care se produce cea de a doua descărcare de insulină, amplă și de lungă durată. Faza a doua a insulinoscreției are la bază atât eliberarea stocului preexistent de insulină, cât și activarea enzimelor implicate în sinteza și secreția insulinei nou-formate. În general, hipersecreția de insulină este rapidă și proporțională cu concentrația glucozei din sânge. La concentrația de 4–6 g/l glucoză sanguină, insulinoscreția bazală de 10–70 mU/ml poate crește de 10–30 de ori față de valorile de bază. Revenirea la normal se realizează la scurt timp (câteva minute) după scăderea glucozei din sânge. În felul acesta, debitul insulinoscreției este adaptat în permanență la conținutul glucozei sanguine, pentru a menține glicemia constantă la o valoare medie de 0,9–1 g/l. Creșterea glucozei din sânge determină prin reacții de *feed-back* stimularea secreției de insulină și invers, în vederea restabilirii echilibrului glicemic. Reacțiile pancreatice corectoare se produc prin două mecanisme:

- prin acțiunea directă a glucozei sanguine asupra celulelor beta-insulare secretoare de insulină;
- prin mecanism neuro-reflex, cu participarea centrilor glicoregulatori hipotalamici și a nervilor insulinoscretori vago-simpatici.

Reglarea umorală directă este mai importantă decât cea reflexă. Ea ține de marea sensibilitate a insulelor pancreatice față de glucoză.

Transplantarea pancreasului în regiunea gâtului la nivelul vaselor carotido-jugulare reduce hiperglicemia câinelui diabetic și nu provoacă hipoglicemie la animalul normal, deși i se dublează țesutul secretor pancreatic. Secreția de insulină se adaptează deci la conținutul în glucoză al sângelui în afara oricărei participări nervoase, pe cale exclusiv umorală.

În afara glucozei, alți produși de digestie, ca aminoacizii și acizii grași, sunt capabili să stimuleze secreția de insulină. Dintre aminoacizi, arginina și lizina posedă proprietăți insulinoscretore. Acțiunea lor este mai puternică pe fondul hiperglicemiei și constă, de fapt, în potențarea efectelor stimulante ale glucozei. Hormonii gastro-intestinali (gastrina, secretina, colecistokina și GIP) stimulează moderat secreția de insulină. Însăși insulinemia este un factor de autoreglare a insulinoscreției prin *feed-back* negativ. Secreția zilnică variază în jurul a 40 U.I.

Reglarea nervoasă este asigurată neuro-reflex de inervația simpatico-parasimpatică a pancreasului, dependentă de plexul solar.

În timp ce stimularea nervilor vagi activează insulinoscreția, simpaticul acționează în sens inhibitor. La rândul lor, vagii transmit impulsuri activante de la nivelul centrilor insulinoscretori din nucleul ventrolateral al hipotalamusului. Reglarea nervoasă centrală, deși nu este indispensabilă, asigură secreția „psihică” de insulină. Ca factori umorali ai reglării nervoase vegetative, participă acetilcolina în sens activator și catecolaminele în sens inhibitor, prin intermediul receptorilor alfa-adrenergici, IP₁ și calciului și a beta-receptorilor adrenergici prin cAMP.

13.5.2. GLUCAGONUL

Glucagonul este cel de al doilea hormon pancreatic ce participă la reglarea echilibrului glicemic în sens hiperglicemiant. Încă de la primele încercări de utilizare a extractelor pancreatice în scop terapeutic, s-a remarcat că efectele hipoglicemiant nu apăreau imediat, ci erau precedate de o scurtă fază hiperglicemică. Ipoteza existenței unui posibil alt factor pancreatic decât insulina a fost confirmată de Burger, care a izolat în 1930 glucagonul, prevăzut cu acțiuni hiperglicemiant și glicogenolitice. Ulterior, Staub (1950) i-a stabilit greutatea moleculară, de 3485 de daltoni, și structura chimică, precizând că este vorba de un polipeptid format din 29 de aminoacizi. În ceea ce privește originea glucagonului, numeroase fapte experimentale au dus la concluzia că el este secretat de celulele alfa ale insulelor Langerhans, dintr-un precursor (preproglucagon), care conține glicentin, în afară de glucagon, cu rol necunoscut încă. Astfel, extractul de pancreas prelevat de la animale tratate în prealabil cu aloxan (în vederea distrugerii celulelor beta) prezintă numai efecte hiperglicemiant. Administrarea clorurii de cobalt, din contră, distruge selectiv celulele alfa, lăsând intactă secreția beta-insulară. La rândul lor, tehnicile imunofluorescente au precizat sediul secreției de glucagon la nivelul celulelor alfa, cu localizare predominantă în coada pancreasului. În sfârșit, metoda radioimunologică a permis să se deceleze glucagonul în venele pancreatice, alături de insulină. Concentrația sa sanguină este în general mai mică decât a insulinei. Valorile plasmatice bazale variază între 75 și 80 pg/ml.

Acțiuni fizio-farmacologice. Spre deosebire de insulină, glucagonul posedă două principale acțiuni metabolice opuse acesteia. El acționează în sens glicogenolitic și gluconeogenetic, producând efecte hiperglicemiant. Acțiunea glicogenolitică apare evidentă la 0,01 mg pe ficatul izolat de câine. La omul adult, administrarea intramusculară a 1 mg de glucagon provoacă o hiperglicemie marcată în următoarele 30 de minute, care persistă 2–3 ore. Efectul hiperglicemiant este de 30–50 de ori mai puternic decât al adrenalinei și se datorește intensificării glicogenolizei hepatice. În favoarea naturii exclusiv hepatice a hiperglicemiei rezultate pledează faptul că glucagonul este fără efect atât la animalul în prealabil hepatectomizat, cât și la diabetici, cu rezerve de glicogen modeste sau nule la nivelul ficatului. De altfel, acțiunea maximă a glucagonului este obținută în cazul injectării sale în vena portă. *In vitro*, glucagonul activează glicogenoliza numai în cupe de țesut hepatic, nemodificând conținutul în glicogen al musculaturii striate (hormon al eliberării de energie).

După cum se știe, glicogenoliza constă din transformarea glicogenului în glucozo-1-fosfat, cu participarea obligatorie a fosforilazei. În celula hepatică, aceasta se găsește sub formă inactivă, de fosforilază B. În prezența glucagonului, este activată de adenilat ciclaza membranală formatoare de cAMP, ca principal factor de activare a protein kinazei și transformare a fosforilazei-B, inactivă, în fosforilază-A, activă. În felul acesta, acțiunea glicogenolitică a glucagonului apare mediată la nivelul celular de sistemul adenilat ciclază-cAMP, după cum urmează:



Fenomenul în cascadă astfel realizat, cu participarea cAMP având rol de al doilea mesager, funcționează ca un sistem amplificator, care face posibilă acțiunea hiperglicemiantă a glucagonului la doze foarte mici.

La rândul său, gluconeogeneza este activată și după epuizarea rezervelor hepatice de glicogen. Efectul gluconeogenetic se datorește activării enzimelor implicate în conversia piruvatului la fosfoenolpiruvat și transformării unor aminoacizi în glucoză. În paralel, glucagonul crește extracția aminoacizilor din sânge de către celulele hepatice și activează lipaza din adipocite. Participând la procesul de gluconeogeneză, atât aminoacizii, cât și acizii grași contribuie la hiperglicemia indusă de glucagon.

Reglarea secreției de glucagon. Conținutul în glucoză al sângelui este de departe cel mai puternic factor de reglare și control al secreției de glucagon. Folosindu-se circulația încrucișată ca model experimental, s-a demonstrat că hipoglicemia stimulează secreția de glucagon, în timp ce hiperglicemia face oficiul invers. Paralel cu creșterea insulinosecreției, aportul exagerat de glucide inhibă secreția de glucagon. Dezechilibrele glicemice declanșează astfel reacții corectoare cuplate, la care participă ambii hormoni pancreatici. Acestea sunt dominate însă de efectele hipoglicemiant ale insulinei, întrucât pancreatectomia este constant urmată de hiperglicemie și diabet experimental.

Contrar hiperglicemiei, creșterea aminoacizilor și în special a alaninei și argininei după un prânz hiperproteic stimulează secreția ambilor hormoni pancreatici, pentru a asigura energia necesară sintezei proteice tisulare. În efort, de asemenea, crește concentrația glucagonului din sânge de 4-5 ori. Colecistokinina și gastrina cresc, iar secretina scade secreția de glucagon.

Intervenția glucagonului apare mai evidentă la animalele cu diabet aloxanic, decât la cele pancreatectomizate, datorită persistenței celulelor alfa secretoare de hormon hiperglicemiant.

Componenta umorală a autoreglării secreției de glucagon este întregită, ca și în cazul insulinei, de veriga nervoasă, reprezentată de inervația vegetativă simpatico-parasimpatică a pancreasului. Simpatul este glucagonosecretor, iar vagul inhibă secreția alfa-insulară de glucagon. La rândul lor, cele două tipuri de fibre vegetative sunt sub controlul centrilor glicoregulatori din hipotalamus, care vor fi discutați ulterior.

13.5.3. SOMATOSTATINUL

Somatostatinul este secretat de celulele delta din insulele Langerhans. Ca și somatostatinul hipotalamic, este un polipeptid format din 14 aminoacizi, cu durată de viață scurtă în sângele circulant, doar de 2 minute. Secreția sa este stimulată de aproape toți factorii umorali influențați de ingestia alimentelor, începând cu creșterea glucozei, aminoacizilor și acizilor grași în sânge și sfârșind cu concentrația crescută a unora din hormonii gastro-intestinali (secretina, pancreozimina etc.) eliberați sub influența alimentelor ingerate.

La nivelul pancreasului, somatostatinul exercită efecte inhibitoare atât asupra secreției de insulină, cât și de glucagon. La nivel gastro-intestinal inhibă motilitatea secrețiilor și absorbția nutrienților, temporizând degradarea și asimilarea lor.

13.5.4. POLIPEPTIDUL PANCREATIC

Polipeptidul pancreatic, format din 36 de aminoacizi, este secretat sub influența alimentelor bogate în proteine de către celulele PP de la nivelul procesului uncinat și capul pancreasului. Dintre hormonii gastro-intestinali, secretina, VIP, GIP și bombesina stimulează eliberarea sa, iar somatostatinul o inhibă.

Principala acțiune a polipeptidului pancreatic este de inhibare a secreției de bicarbonați a pancreasului exocrin atât în condiții bazale, cât și de activare cu secretină.

Inhibarea secreției exocrine pancreatice este dublată de creșterea motilității gastrice și intestinale.

Deși nu i se cunoaște rolul fiziologic, polipeptidul pancreatic prezintă mari variații în diferite stări patologice. El inhibă absorbția intestinală.

Eliberarea sa este scăzută în insuficiența pancreatică și apare mult crescută în pancreatita cronică și tumorile de pancreas.

Plasma conține și factori de creștere insulin-like: IGF-1 (sau somatomedina-C) și IGF-2 (sau somatomedina-A), prevăzuți cu acțiuni stimulatorie ale creșterii cartilajelor și proteinelor tisulare. Ei sunt eliberați de somatoliberină (STH), pe care o inhibă prin relații de *feed-back* negativ.

13.5.5. REGLAREA GLUCOZEI SANGUINE

Glucosa fiind singurul nutrient utilizat în scop energetic de către creier, rină și epiteliul germinativ gonadal, menținerea sa în concentrații normale este asigurată pe mai multe căi.

Conținutul în glucoză al sângelui variază între 0,8 și 0,9 g/l dimineața pe nemâncate, pentru ca după mese să crească până la 1,20-1,40 g/l. Sistemele de autoreglare și control restabilesc echilibrul glicemic în aproximativ 2 ore de la absorbția hidrocarbonatelor prin reacțiile neuro-endocrino-metabolice, de *feed-back* negativ, cu participarea insulinei ca principal hormon hipoglicemiant. Fenomene inverse se produc în cazurile de starvare, cu participarea funcției gluconeogenetice a ficatului în vederea formării glucozei necesare menținerii glicemiei în limite normale.

Ficatul, ca principal sistem tampon al glucozei sanguine, depozitează sub formă de glicogen aproximativ 2/3 din glucoza absorbită din intestin după mese sub influența secreției crescute de insulină.

În orele următoare, când scad atât glicemia, cât și insulina din sânge, ficatul eliberează glucoza pentru a restabili echilibrul glicemic.

În felul acesta, sistemul tampon hepatic scade variațiile concentrației glucozei din sânge de aproape trei ori.

La rândul lor, hormonii pancreatici intervin ca principali factori de reglare și menținere a echilibrului glicemic în limite constante. Când concentrația glucozei sanguine depășește valorile normale, secreția de insulină crește, pentru a o reduce la normal. Invers, scăderea glicemiei stimulează secreția de glucagon, prevăzută cu efecte de tip hiperglicemiant (fig. 13.27).

În condiții normale, deși mecanismul de *feed-back* insulinic este mai important decât cel al glucagonului, acesta din urmă devine dominant în cazurile de consum exagerat glucidic de efort, stres psihomemoțional etc.

Hipoglicemia exercită efecte stimulante și asupra sistemului nervos simpatic, prin intermediul centrilor glicoregulatori hipotalamici. Adrenalina eliberată din glandele medulosuprenale, activând glicogenoliza hepatică, va contribui la îndepărtarea hipoglicemiei severe. La efectul hiperglicemiant al glucagonului și adrenalinei se adaugă, în orele și zilele următoare, hormonul de creștere și cortizolul, secretați în exces ca răspuns la hipoglicemia prelungită. O mare parte din glucoza formată prin gluconeogeneză

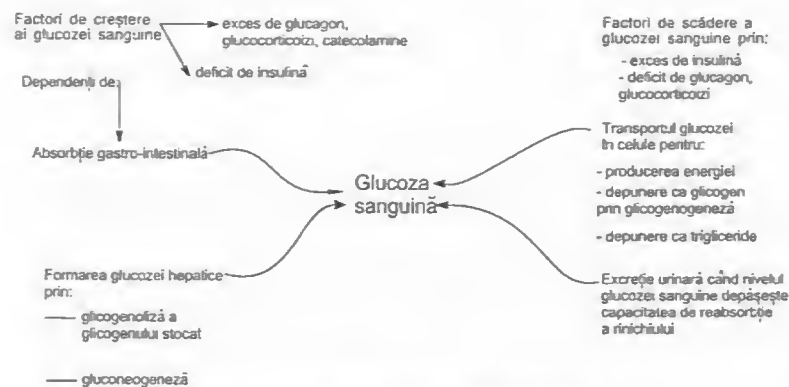


Fig. 13.27. Factori de reglare a echilibrului glicemic.

în timpul perioadei interdigestive este folosită pentru metabolismul cerebral. În această perioadă, secreția de insulină scade, pentru a se evita consumul exagerat de glucoză la nivel periferic și a permite utilizarea ei de către creier.

Nu mai puțin importantă este autoreglarea glicemiei în cazurile în care aceasta are tendință la creștere, din cel puțin trei considerente:

a) glucoza crescând, presiunea osmotică a plasmei extracelulare peste valorile normale va cauza deshidratare celulară (diureză osmotică);

b) glucoza fiind substanță cu prag renal de eliminare, concentrațiile înalte de peste 1,8 g/l o vor duce la pierdere prin urină a unei părți din glucoza sanguină;

c) hiperglicemia determinând diureză osmotică poate crea depleție de lichide și electroliți. Principala cauză a creșterii glucozei din sânge rămâne deficitul sau lipsa secreției de insulină. În lipsa acesteia, scăzând utilizarea glucozei și crescând atât mobilizarea, cât și consumul de lipide și proteine, apar dezechilibrele metabolice și funcționale caracteristice diabetului zaharat.

13.6. PARATIROIDELE

Hormonul paratiroidian deține rolul principal la toate vertebralele în menținerea concentrației normale a calciului și fosforului în diversele țesuturi și umori. La om, ionii de calciu și fosfor sunt de importanță fundamentală pentru toate sistemele biologice, începând cu energetica celulară, mediația chimică și excitabilitatea membranală și sfârșind cu osteogeneza, contracția musculară, secrețiile glandulare și coagularea sângelui sau laptelui. Homeostazia lor este asigurată pe cale endocrină, cu participarea obligatorie a hormonului paratiroidian și a calcitoninei, pe de o parte, și a oaselor, tubului digestiv și rinichilor, pe de altă parte, ca principale teritorii efectoare. Înainte de a prezenta mecanismele hormonale de autoreglare și control al metabolismului fosfo-calcic, o scurtă trecere în revistă a distribuției și concentrațiilor acestor ioni în organismul uman este necesară.

13.6.1. DISTRIBUȚIA IONILOR DE CALCIU ȘI FOSFOR

Organismul uman adult conține 1 000–1 100 g calciu, 99% având sediu extracelular, iar 1% fiind intracelular. Cea mai mare parte (aproape 1 kg) se găsește în matricea oaselor și numai 1–1,5 g în lichidele extracelulare.

Concentrația plasmatică normală a calciului este de 9,4–9,5 mg/dl, cu variații mici în plus sau în minus între 9 și 10 mg/dl, ceea ce corespunde la 4,5–5,3 mEq/l sau 2,4–2,6 mmol/l. Aproximativ 50% din calciul plasmatic este ionizat, constituind forma biologic activă, 40% este combinat cu proteinele plasmatic, reprezentând forma nedifuzibilă prin membranele capilarelor, și 10% se găsește sub formă complexată de citrat, fosfat sau bicarbonat de calciu, neionizată, dar difuzibilă. Datorită acestui fapt, numai jumătate din calciul existent în plasmă și lichidele interstițiale participă la asigurarea funcțiilor sale biologice multiple.

Bilanțul calciului depinde de aportul alimentar, de intensitatea proceselor de absorbție și excreție gastro-intestinală și renală, precum și de permanenta mobilizare și depunere osoasă (fig. 13.28).

Aportul alimentar zilnic asigură în jurul a 1 000 mg calciu preluate din pâine, ouă, carne, legume, lapte și derivatele lui etc. Acesta este supus unui intens *turnover* la nivel gastro-intestinal și renal, reprezentat de procesele de absorbție și eliminare continuă. La adult, intensitatea lor medie este următoarea:

Ingestie	1 000 mg
Absorbție intestinală	350 mg
Secreție în sucuri digestive	190 mg
Absorbție din sucuri digestive	170 mg
Pierderi prin fecale	630 mg
Eliminări urinare	170 mg

Din acest bilanț reiese că doar 1/3 din calciul ingerat se absoarbe la nivel intestinal și că aproape 2/3 se pierd prin materiile fecale. În general, absorbția netă a ionilor de calciu nu depășește 100–200 mg pe zi.

Eliminarea calciului pe cale urinară se realizează în același mod ca cea a sodiului, în funcție de concentrația sa plasmatică și de reabsorbția tubulară predominant proximală. Când concentrația ionilor de calciu este mică în sânge, reabsorbția tubulară crește până la 98%, iar pierderea pe cale urinară devine infimă. Fenomene inverse se produc în cazul hipercalemiei.

La rândul său, fosforul se găsește în plasmă sub două forme de fosfat anorganic: HPO_4^- și H_2PO_4^- . Cele două forme sunt curent exprimate în mg de ioni de fosfor, concentrația plasmatică normală a acestora variind între 3 și 4,5 mg/dl, sau 1–1,45 mmol/l.

Spre deosebire de calciu, absorbția ionilor de fosfor din intestin este direct proporțională cu ingestia de alimente, rolul principal în reglarea adaptativă a fosfaților revenind rinichilor. Cea mai mare parte din fosfații de origine alimentară sunt absorbiți la nivel intestinal și excretați ulterior pe cale urinară.

Fosfații, fiind substanțe cu prag de eliminare, nu sunt eliminați prin urină când concentrația lor plasmatică este sub nivelul critic de 1 mmol/l. Când concentrația critică a fosfaților este depășită, eliminările urinare sunt direct proporționale cu creșterea concentrației plasmatic. În felul acesta, rinichii reglează conținutul de ioni fosfați ai lichidelor extracelulare în funcție de concentrația lor plasmatică. Excreția urinară a fosfaților este mult crescută de către hormonul paratiroidian, concomitent cu activarea reabsorbției ionilor de calciu. Indiferent de aportul și eliminarea fosforului, variațiile calcemiei sunt reduse din cauza participării țesutului osos la homeostazia fosfo-calcică.

Depunerea și resorbția osoasă a calciului. La nivelul oaselor au loc procese permanente de depunere și resorbție a ionilor de calciu și fosfor. Dacă în timpul perioadei de creștere predomină procesele de depunere, la adult și vârstnic are loc un intens proces de remodelare osoasă, determinat de predominanța resorbției asupra depunerii de calciu. Aproximativ 15% din masa osoasă totală se primește anual prin procesul de remodelare. Acesta ajustează forma și consistența oaselor la modificările survenite privind gradul lor de uzură și solicitare.

Depunerea sărurilor de calciu și fosfor are loc pe matricea organică formată aproape exclusiv din fibre de colagen și substanță fundamentală, sintetizate de către celulele osteoblaste. Din precipitarea și fixarea sărurilor respective pe suprafața fibrelor de colagen, cu participarea osteocalcinei, rezultă cristalele de hidroxiapatită. Aproximativ 20–30% din sărurile de calciu rămân necristalizate, în stare amorfă, la suprafața oaselor parțial mineralizate, pentru a fi resorbite rapid și deplasate spre lichidele extracelulare. Această fracție ușor mobilizabilă a fost denumită fracția de schimb rapid a calciului (*rapidly exchangeable pool*). Întrucât participă la restabilirea promptă a echilibrului fosfo-calcic ori de câte ori acesta este tulburat.

Cu ajutorul calciului radioactiv s-a stabilit că, deși mari cantități (30–40 g) traversează fracția de schimb rapid, doar 500 mg participă la procesul de remodelare. Un rol important în transferul de calciu revine osteocitelor, care realizează o veritabilă osteoliză osteocitică.

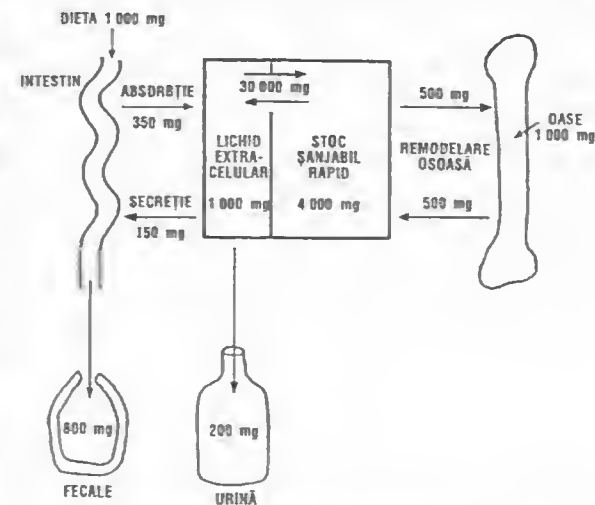


Fig. 13.28. Turnover-ul zilnic al calciului la om.

Resorbția ionilor de calciu din oase se datorește activității osteolitice predominante a osteoclastelor, celule multinucleate, bogate în prelungiri „viloase” și lizozomi. Aceștia secretă enzime proteolitice de tipul collagenazei, prevăzute cu acțiuni depolimerizante ale matricei osoase și hidrolaze acide formatoare de acizi citric și lactic. Primele dizolvă componenta organică a țesutului osos, iar acizii realizează solvarea sărurilor minerale. La rândul lor, prelungirile „viloase” fagocitează resturile osoase în vederea digerației lor de către cele două tipuri de enzime lizozomale.

Procesele de formare și resorbție a țesutului osos sunt cuplate și coordonate local cu ajutorul hormonilor stimulatori și inhibitori ai osteosintezei și osteolizei. Din prima categorie, a stimulatorilor osteosintezei, fac parte hormonul de creștere, somatomedina, insulina, androgenii și vitamina D. Ca inhibitori ai formării osoase acționează hormonii corticosteroidi. Din cea de a doua categorie, a activatorilor resorbției de țesut osos, fac parte hormonul paratiroidian, vitamina D₃, cortizolul, hormonii tiroidieni și prostaglandinele. Inhibarea resorbției osoase se realizează cu ajutorul calcitoninei și al estrogenilor. Dintre toți acești factori hormonal, hormonul paratiroidian, calcitonina și metabolitul hidroxilat al vitaminei D₃ participă și la menținerea homeostaziei calcice. Acționând la nivelul organelor implicate în controlul bilanțului mineral, ei asigură distribuția și concentrația normală a calciului în umorile organismului.

13.6.2. HORMONUL PARATIROIDIAN (PTH)

Secretat de cele două perechi de glande paratiroidice situate superior și inferior pe fața postero-laterală a lobilor tiroidieni, PTH este cel mai important factor umoral de reglare a metabolismului fosfo-calcic. Existența sa a fost mult timp controversată din cauza relațiilor de intimă vecinătate a paratiroidelor cu glanda tiroidă, deși tabloul clinic (hiperexcitabilitate neuro-musculară, cu contracții tonico-clonice, spasm laringian, agitație, tahicardie, polipnee, tulburări trofice cutanate, cataractă, căderea părului) și umoral (scăderea calciului și creșterea fosforului seric, alcaloză) al insuficienței paratiroidiene era cunoscut. De abia în 1925, Collip și colab. au putut diferenția efectele biologice ale acestuia de ale hormonilor tiroidieni pe animale cu paratiroidectomie selectivă. Preparând un extract paratiroidian, autorii sus-citați au evidențiat efectele hipercalcemiantе ale acestuia la câinele paratiroidectomizat. Ulterior s-a trecut la izolarea și identificarea fracției active, stabilindu-se că aceasta se găsește într-un precursor polipeptidic format din 115 aminoacizi, ce face oficiul de prohormon. Din clivarea acestuia la nivel ribozomal rezultă prohormonul respectiv cu 90 de aminoacizi, care este apoi transportat în aparatul Golgi și convertit în PTH propriu-zis, constituit dintr-un singur lanț peptidic cu 84 de aminoacizi. Greutatea sa moleculară este la om de 9 500 de daltoni, cu mici variații în funcție de specie. Eliberat în circulație prin exocitoză, PTH realizează o concentrație medie de 0,5 ng/ml. El își datorește activitatea biologică primilor 34 de aminoacizi din lanțul său polipeptidic. Țesuturile periferice îl degradează, scindându-l în mai multe fragmente. Fragmentul peptidic (amino-N-terminal) 1-34 este activ indiferent de originea animală, asigurând peste 75% din activitatea hormonului.

Fragmentele carboxi-C-terminale rezultate din degradarea hormonului sunt inactive. În general, perioada de înjumătățire a activității hormonului nu depășește 10-20 de minute.

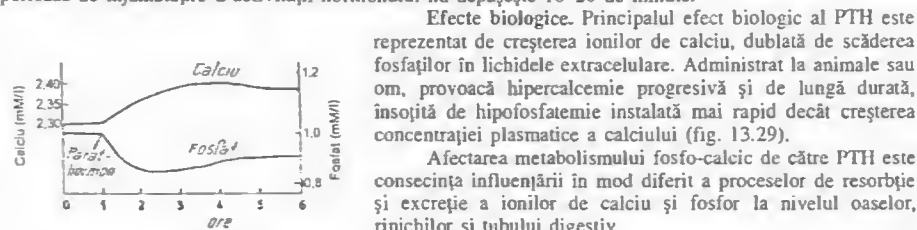


Fig. 13.29. Efectele parathormonului asupra echilibrului fosfo-calcic.

Efecte biologice. Principalul efect biologic al PTH este reprezentat de creșterea ionilor de calciu, dublată de scăderea fosfaților în lichidele extracelulare. Administrat la animale sau om, provoacă hipercalcemie progresivă și de lungă durată, însoțită de hipofosfatemie instalată mai rapid decât creșterea concentrației plasmatice a calciului (fig. 13.29).

Afectarea metabolismului fosfo-calcic de către PTH este consecința influențării în mod diferit a proceselor de resorbție și excreție a ionilor de calciu și fosfor la nivelul oaselor, rinichilor și tubului digestiv.

La nivelul oaselor, PTH determină activarea resorbției de calciu și fosfați în două faze, una rapidă și alta lentă. În prima fază, PTH activează pompa de calciu de la nivelul membranelor

osteocitare, care separă țesutul osos amorf de lichidul extracelular, producând permeabilizarea și deplasarea rapidă a sărurilor de calciu din fluidul canalicular osos în osteocit și de aici spre lichidul extracelular de partea opusă. Osteoliza rezultată se realizează fără resorbția fosfaților sau degradarea matricei osoase în această primă fază. Cea de a doua fază are la bază stimularea osteoclastelor și demineralizarea propriu-zisă a oaselor. PTH provoacă atât activarea osteoclastelor existente, cât și formarea de noi osteoclaste din celula primitivă, osteoprogenitoare. Efectul stimulant asupra osteoclastelor este lent și de lungă durată și se însoțește de inhibarea tranzitorie a activității osteoblastelor. Sub influența activității predominante a osteoclastelor se produce hidroliza matricei organice osoase de către collagenază și enzimele lizozomale, urmată de eliberarea și transferul atât al calciului, cât și al fosfatului în lichidele extracelulare. Concomitent, PTH crește fosfataza acidă și producția de acid lactic și, totodată, scade pH, favorizând procesul de resorbție și demineralizare osoasă. Astfel, administrarea prelungită sau hipersecreția de PTH duce la distrugerea zonelor corticale și trabeculare ale oaselor, la eliberarea hidroxiprolinei în lichidele extracelulare și la eliminarea ei urinară, precum și la formarea unor cavități osoase cu conținut bogat în osteoclaste gigante. Efectele osteolitice ale PTH necesită, după cum se va vedea în continuare, prezența unui metabolit specific al vitaminei D₃. Resorbția osteoclastică produsă de PTH este urmată după câteva zile sau săptămâni de un oarecare grad de stimulare compensatoare a osteoblastelor în vederea refacerii țesutului osos.

De altfel, dozele mici de PTH cresc numărul osteoblastelor și sinteza collagenului pe culturi de celule osoase. În condițiile organismului întreg, efectele osteolitice ale PTH predomină asupra celor de depunere osteoblastică, predispunând la osteită fibrochistică, caracteristică fenomenelor de hiperparatiroidism.

Deficitul secretor de PTH din insuficiența paratiroidiană, reducând activitatea osteoclastelor și conținutul în calciu al plasmiei, determină fenomene de tetanie latentă sau manifestă, reprezentate de creșterea excitabilității neuro-musculare, spasm laringian, insomnii, anxietate etc.

La nivel renal, PTH exercită efecte duble de activare a resorbției calciului în tubii distali și de inhibare a reabsorbției fosfatului în tubii proximali. Cel de al doilea efect predomină de departe asupra primului.

Efectul fosfaturic al PTH se însoțește de creșterea calcemiei și reducerea calciuriei. În afara acțiunii cuplate asupra balanței fosfo-calcice, PTH crește reabsorbția ionilor de magneziu și hidrogen, în timp ce scade pe cea a sodiului, potasiului și aminoacizilor. PTH inhibă, de asemenea, absorbția bicarbonatului în tubul proximal, de o manieră asemănătoare celeia a fosfatului. Prin această acțiune se previne apariția alcalozei metabolice, care ar putea rezulta din eliberarea bicarbonatului în timpul disocierii cristalelor de hidroxipatită din oase. În sfârșit, PTH stimulează la nivelul tubilor renali sinteza metabolitilor vitaminei D₃, cu acțiune asupra resorbției intestinale și osoase. Scăderea fosfaților din plasmă produsă de PTH, ca urmare a efectelor fosfaturice, potențează acțiunea directă a acestuia asupra metabolizării renale a vitaminei D₃, contribuind astfel la activarea resorbției fosfo-calcice și la creșterea calciului plasmatic.

Deși nu face parte din categoria hormonilor clasici de origine glandulară, vitamina D participă prin derivații săi la reglarea hormonală a metabolismului fosfo-calcic. Mai exact, atât vitamina D₂ (ergocalciferolul) de origine alimentară, cât și vitamina D₃ (colecalciferolul), produsă în piele prin iradierea cu ultraviolete, sunt convertite la nivel hepatic în 25-hidroxicoalecalciferol, care, la rândul său, este transformat în 1,25-dihidroxicoalecalciferol (calcitriol) la nivelul celulelor tubulare renale, cu participarea obligatorie a PTH (fig. 13.30).

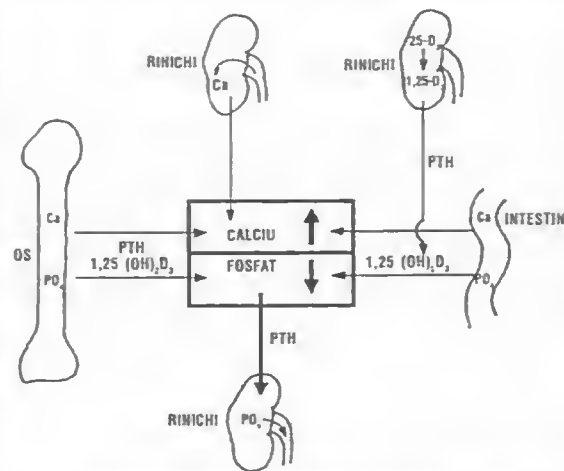


Fig. 13.30. Influența hormonului paratiroidian (PTH) asupra vitaminei D₃.

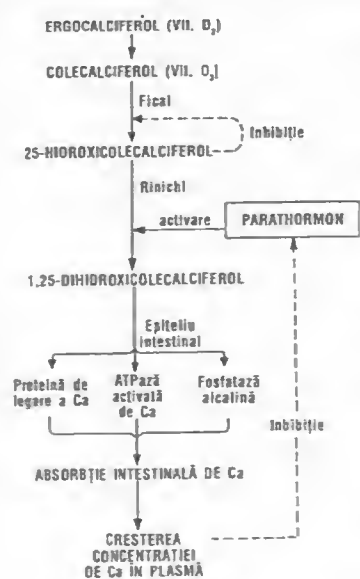


Fig. 13.31. Rolul hormonului paratiroidian și al 1,25-dihidroxicolecalciferolului în autoreglarea calciemiei.

efectelor PTH asupra resorbției osoase de calciu de către $1,25(\text{OH})_2\text{D}_3$ se realizează prin mecanisme insuficient cunoscute. Nu se știe dacă aceasta îndeplinește rol de cofactor intracelular sau dacă stimulează sinteza unei proteine transportoare în spațiile extracelulare, în vederea resorbției, de o manieră asemănătoare celei intestinale. Sigur este faptul că o mare parte din acțiunile PTH sunt mimate *in vivo* de administrarea cAMP sau a unuia din analogii structurali ai acestuia.

Efectele metabolice multiple ale PTH sunt interpretate în mod diferit de partizanii teoriei osteolitice sau fosfaturice. Primii pun creșterea calciului plasmatic dublată de scăderea fosfaților pe seama resorbției predominante a ionilor de calciu din oase, iar ceilalți o consideră consecință eliminării exagerate de fosfați pe cale urinară. Ambele dezechilibre ionice determină reacții compensatoare locale și generale în vederea restabilirii și menținerii echilibrului fosfo-calcic, cu participarea nu numai a PTH și $1,25(\text{OH})_2\text{D}_3$ ca principali factori hormonalți hipercalcemianți, ci și a calcitoninei, prevăzută cu acțiuni hipocalcemizante.

Reglarea secreției de PTH. Sinteza și eliberarea PTH sunt dependente de concentrația ionilor de calciu din plasmă. Hipocalcemia stimulează, iar hipercalcemia inhibă secreția hormonului prin mecanismul acțiunii directe a calciului asupra celulelor principale din țesutul glandular paratiroidian. Transplantarea paratiroidelor în orice zonă a corpului asigură în continuare homeostazia calcică.

Efectele reglatoare produse pe cale exclusiv umorală apar evidente la cele mai mici variații ale calciului sanguin. Scăderea acestuia cu doar 1% este suficientă pentru a determina în următoarele 3-5 minute o dublare a secreției de PTH. Dacă hipocalcemia este de lungă durată, țesutul glandular paratiroidian se hipertrofiază compensator de 4-5 ori sau mai mult, în vederea creșterii activității sale secretorii și restabilirii concentrației normale a ionilor de calciu din sânge.

Reacțiile compensatoare de tip hiperplazic și hipersecretor ale paratiroidelor devin maxime în cazul scăderii calciului seric sub 7 mg/dl. Asemenea reacții apar în timpul sarcinii sau lactației ca urmare a consumului crescut de calciu sau a deficitului alimentar din rahitism. Efecte inverse, de tip inhibitor,

Metabolitul dihidroxilat al vitaminei D₃ în pozițiile 1 și 25 [$1,25(\text{OH})_2\text{D}_3$] potențează acțiunea PTH asupra resorbției osoase și crește absorbția intestinală a calciului și fosforului. Așadar, activarea absorbției calciului și fosfatului la nivel intestinal de către PTH se realizează în mod indirect prin intermediul $1,25(\text{OH})_2\text{D}_3$. La rândul său, rolul „hormonal” al $1,25(\text{OH})_2\text{D}_3$ se datorește formării unei proteine de legare a calciului în celulele epiteliale intestinale. Aceasta preia și transportă ionii de calciu în citoplasma celulară, de unde îi deplasează apoi spre membrana bazală și capilarul sanguin prin difuziune facilitată. Concomitenți $1,25(\text{OH})_2\text{D}_3$ activează și absorbția de fosfați cuplată cu a calciului, cu participarea ATPazei calciu-dependente de la nivelul marginii „în perie” a epitelului intestinal.

Deficitul secretor de PTH determinat de creșterea calciului plasmatic este urmat atât de reducerea 1 alfa-hidroxi-lazei renale și conversiei 25-hidroxicolecalciferolului [$25(\text{OH})\text{D}_3$] în $1,25(\text{OH})_2\text{D}_3$, cât și de scăderea resorbției calcice intestinale. Fenomene inverse se produc în cazul hipocalcemiai și hipersecreției de PTH. Prin astfel de relații de *feed-back* negativ și pozitiv se asigură rolul vitaminei D₃ în controlul calciemiei (fig. 13.31).

Cât privește acțiunile directe ale PTH asupra resorbției osoase, acestea se produc prin mecanismul fixării hormonului pe receptori membranari specifici ai osteoclastelor și stimulării sistemului adenilat ciclază-cAMP. Sub influența acestuia este declanșat fenomenul în cascadă al activării protein kinazelor și fosforilării unei proteine necesare transportului crescut de calciu spre lichidele extracelulare. La rândul său, potențarea

provoacă hipercalcemia prin mecanismul deprimării țesutului glandular și sintezei de PTH. La aceasta se adaugă intensificarea degradării intraglandulare a hormonului și inhibarea lansării sale în circulație. Asemenea reacții inhibitoare pot produce alimentația bogată în calciu sau vitamine, precum și resorbția osoasă crescută din timpul imobilizării îndelungate.

Inhibarea secreției de PTH devine maximă când concentrația calciului a depășit 11 mg/dl. Ea nu este totală, ci se menține la un nivel bazal scăzut, indiferent de creșterea ulterioară a hipercalcemiei.

Adaosul sau sustragerea ionilor de calciu din lichidele extracelulare, determinând reacții compensatoare inverse ale secreției de PTH, sunt astfel rapid contracarate de efectele metabolice multiple ale acestuia, în vederea restabilirii homeostaziei calcice.

La reacțiile de *feed-back* negativ și pozitiv ale autoreglării secreției paratiroidiene de către variațiile ionilor de calciu din plasmă se adaugă modularea lor de către ionii de magneziu. Hipomagneziemia, de exemplu, reducând sinteza de PTH, inhibă secreția acestuia. Fenomenul nu pare să aibă însă o importanță fiziologică prea mare. Ionii fosfat, de asemenea, nu, intervin direct, ci prin intermediul modificărilor produse în concentrația ionilor de calciu. Creșterea fosfaților din plasmă, însoțindu-se de scăderea calciului, determină activarea secreției de PTH și invers, cu consecințele respective asupra eliminării urinare a acestora.

Un oarecare grad de participare la autoreglarea secreției paratiroidiene există și în cazul vitaminei D₃. Metabolitul acesteia, $1,25(\text{OH})_2\text{D}_3$, potențând resorbția osoasă și intestinală a ionilor de calciu, exercită efecte inhibitoare asupra secreției de PTH prin reacții de *feed-back* negativ realizate de excesul de calciu seric.

În general, reacțiile de reglare a secreției de PTH sunt cuplate cu ale calcitoninei, mai ales la copii și tineri. Sensul lor diferă însă, creșterea secreției de PTH produsă de hipocalcemia însoțindu-se de scăderea calcitoninei și invers, pentru a asigura eficacitatea reacțiilor compensatoare de restabilire a echilibrului fosfo-calcic.

13.6.3. CALCITONINA

Calcitonina (CT) este cel de-al doilea hormon implicat în reglarea metabolismului fosfo-calcic. Existența ei a fost sugerată mai întâi de Copp și colab. (1961), ca factor hipocalcemizant eliberat de la nivelul complexului glandular tiro-paratiroidian sub influența ionilor de calciu. Ulterior, Munson și colab. (1963) au precizat originea tiroidiană a acesteia la mamifere, dându-i numele de tirocalcitonină. La pești, amfibieni, reptile și păsări, CT este secretată de glandele ultimobrahiale. La om, secreția de CT este asigurată de celulele C parafoliculare, concentrate în porțiunea centrală a lobilor tiroidieni. Acestea sunt celule relativ mari, situate în țesutul interstițial dintre foliculii tiroidieni și bogate în mitocondrii și mici granule secretore. Filogenetic, ele derivă din creasta neurală, fiind de natură neuro-ectodermică și fac parte din sistemul APUD. Neoplasmele tiroidiene plecate de la nivelul celulelor parafoliculare secretă adeseori cantități mari de calcitonină.

Din punct de vedere chimic, CT este un polipeptid constituit din 32 de aminoacizi, cu o punte disulfidică între aminoacizii din pozițiile 1 și 7. Structura sa chimică este similară la om, porc și somon, prezentând unele diferențe numai în ceea ce privește secvența aminoacizilor și o greutate moleculară de 3400 de daltoni.

Ca și în cazul PTH, sinteza CT are loc dintr-un precursor, care conține și un al doilea factor activ, denumit katecalcină, prevăzută cu proprietăți hipocalcemizante, potențatoare ale calcitoninei.

Factorul stimulant major al secreției de calcitonină este reprezentat de creșterea calciului în plasmă. Intensitatea răspunsului secretor variază de la o specie la alta și depinde de nevoia de a preveni hipercalcemia. El este mai intens la animalele care trăiesc în mediul acvatic cu concentrație mare în ioni de calciu.

La om, conținutul plasmatic de calcitonină variază între 10 și 100 pg/ml și crește de 2-10 ori după creșterea bruscă a calciemiei cu 1 mg/dl. Răspunsuri mai brutale se obțin la pacienții cu tumori secretante de calcitonină. Ingestia de alimente stimulează, de asemenea, secreția de calcitonină, fără creșterea calciului în plasmă. Acest efect este mediat de unii hormoni gastro-intestinali și mai ales de gastrină. Calcitonina

circulantă are o perioadă de înjumătățire de 20–30 de minute, fiind degradată la nivel renal și eliminată pe cale urinară.

Acțiunile sale la mamifere și om sunt numai parțial cunoscute. Efectul major al calcitoninei este scăderea rapidă a calciului plasmatic. Amploarea răspunsului hipocalcemic este proporțională cu aceea a *turnover*-ului osos. De aceea, animalele sau persoanele tinere sunt mai afectate decât cele adulte.

Acțiunea hipocalcemică a CT se datorește inhibiției proceselor de osteoliză și resorbție de la nivelul osteoclastelor, mai ales când acestea sunt stimulate de PTH. Alterând structura și activitatea demineralizantă a acestora, CT se comportă ca un veritabil antagonist fiziologic al efectelor osteolitice ale PTH. Spre deosebire de inhibarea resorbției din oase, absorbția intestinală și renală a calciului este mai puțin afectată de CT.

Asupra fosfatului, CT acționează ca și PTH, în sensul scăderii sale din plasmă, ca urmare a preluării de către celulele osoase și complexării cu calciu la acest nivel. Hipofosfemia nu este însă însoțită și de fosfaturie.

Efectele predominant hipocalcemice ale CT se produc pe trei căi principale:

- reducerea activității osteolitice și înclinarea balanței spre depunere rapidă de calciu în fracția mobilă ușor șanjabilă a osului;
- creșterea activității osteoblastice concomitent cu inhibarea osteoclastelor;
- inhibarea formării de noi osteoclaste din celula primitivă, osteoprogenitoare.

Opunându-se resorbției și efectelor hipercalcemice ale PTH, calcitonina încetinește procesul de remodelare osoasă la adult. La copil, din contră, CT favorizează primenirea și creșterea țesutului osos, datorită *turnover*-ului mult mai intens al ionilor de calciu. În boala Paget (osteita deformantă), în care activitatea osteoclastelor este accelerată, CT reduce absorbția calciului.

La baza acestor efecte stă activitatea adenilat ciclazei și sintezei de cAMP celular prin intermediul receptorilor membranari. cAMP ca mesager intracelular, favorizând sechestrarea calciului în mitocondrii, reduce concentrația citosolică a acestuia și efluxul din celulele osoase în lichidul extracelular. O acțiune analgezică a fost recent demonstrată.

Reglarea secreției de CT. Este calciu-dependentă, ca și în cazul PTH. Concentrația ionilor de calciu din plasmă controlează secreția de CT printr-un mecanism de *feed-back* invers celui care reglează secreția de PTH. Astfel, creșterea concentrației calciului determină intensificarea secreției de CT. În cazul creșterii cu aproximativ 10% a calcemiei, debitul secretor al CT crește imediat de 3 până la 6 ori. Durata sa este însă mult mai redusă decât a PTH. Din această cauză, reglarea de lungă durată a echilibrului fosfo-calcic este dominată de PTH. Calcitonina participă mai ales la limitarea efectelor osteolitice ale PTH și la refacerea cât mai rapidă a stocului osos de calciu. Acționând ca un sistem integrat, autoreglarea metabolismului fosfo-calcic este asigurată astfel pe cale umorală dublă, cu participarea PTH, pe de o parte, și a CT tiroidiene, pe de alta. Prin intermediul acestora, calcemia reglează calcemia, ca rezultat al proprii lor activități.

13.7. EPIFIZA

Considerată până nu de mult „secretul rușinos al endocrinologiei”, epifiza a devenit obiectul unor cercetări minuțioase de anatomie comparată, histofiziologie, biochimie și farmacologie de abia în ultimele decenii, după identificarea unor sindroame clinice cu tulburări gonadale dominante (macrogenitosomie) de cauză epifizară.

13.7.1. PARTICULARITĂȚI MORFO-FUNCȚIONALE

La mamifere, epifiza se găsește la nivelul extremității superioare a ventriculului III, între comisura posterioară, îndărăt, și trigonul habenular, înainte, formând împreună cu organul subcomisural un complex neuro-endocrin pericependimar analog celui hipotalamo-hipofizar, denumit complexul epifizo-habenular. La

om, glanda este de mărimea unui bob de mazăre și se prezintă ca un con de pin, situat pe linia mediană, cu baza orientată anterior, de unde și denumirea de pineală.

În timpul dezvoltării filogenetice, epifiza s-a transformat din organ fotoreceptor (al treilea ochi) în formațiune secretorie endocrină, innervată în mod predominant de terminațiile ganglionului simpatie cervical superior, ajunse la glandă atât pe calea plexului carotidian intern și a rețelei nervoase perivascularare pineale, cât și a nervilor conarii, în cazul polului caudal.

Inervația glandei pineale deși pare a fi exclusiv vegetativă de natură simpatică, țesutul glandular prezintă o serie de conexiuni nervoase cu formațiunile diencefalice, rinencefalice și mezencefalice învecinate:

Acestea fac posibilă participarea epifizei la reacțiile neuro-endocrine influențate de rinencefal, pe de o parte, și de hipotalamus, pe de alta. O mare parte din informațiile rinencefalice fiind destinate hipotalamusului, aceiași stimuli par să activeze simultan atât complexul hipotalamo-hipofizar, cât și sistemul epifizo-habenular.

Lumina și întunericul, de exemplu, influențează ritmul nictemeral al secreției epifizare pe cale simpatică, cu participarea căii retino-hipotalamice și a nucleului suprachiasmatic din hipotalamusul anterior.

Structura internă a pinealei prezintă la om toate caracteristicile histologice și metabolice ale unui organ glandular activ nu numai în perioada copilăriei, cum s-a crezut inițial, în tot cursul vieții. Țesutul parenchimos glandular este format din celule secretorie de origine neuro-epitelială, denumite pinealocite, dispuse sub formă de lobuli și prevăzute cu prelungiri perivascularare și contacte sinaptice realizate de terminațiile filetelor simpatice postganglionare. Depozitarea calciului în celulele gliale și stromale perilobulare sub formă de concrețiuni calcare (*corpora arenacea*) nu alterează semnificativ metabolismul și funcția secretorie a pinealocitelor. Acestea sunt bogate în serotonină și mai ales melatonină, ca principal hormon epifizar, de natură indolică.

13.7.2. HORMONII EPIFIZARI

Cercetările de biochimie ale pinealei din ultimele trei decenii au precizat căile de formare a melatoninei din serotonină, rezultată, la rândul său, din transformarea triptofanului în 5-hidroxitriptamină, cu ajutorul unor enzime specifice. Prin acetilarea serotoninei (5-hidroxitriptaminei) de către N-acetil transferază se formează N-acetilserotonina, care este transformată de către hidroxilindol-O-metiltransferază (HIOMT) în melatonină (N-acetilmetoxiseronină). Aceasta a fost descoperită de Lerner și colab. (1959) în extracțele epifizare bovine și denumită astfel datorită acțiunii puternice de albire a pielii de broască, produsă prin mecanismul contracției granulelor pigmentare ale melanocitelor. Dintre derivații metoxilindolici rezultați din metabolizarea serotoninei și melatoninei în pineală, mai important pare a fi produsul de dehidrogenare ciclică – tetrahidroharmanul – care face parte din categoria beta-carbolinelor epifizare, incriminate de Farrel (1961) în stimularea secreției de aldosteron. Dacă adrenoglomerulotrofina, descoperită de Farrel în epifiză ca un factor aldosteronoeliberator, este derivat indolic sau hormon peptidic, rămâne de stabilit.

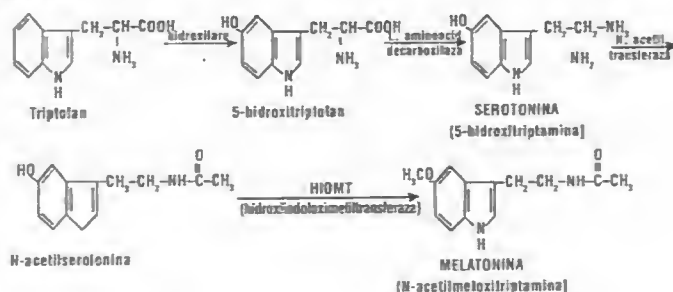
Unul din primii hormoni cu structură polipeptidică identificați în pineală a fost *arginin-vasotocina*. Aceasta îndeplinește rol de hormon antidiuretic hipofizar la vertebratele inferioare, inclusiv la păsări, și numai la mamifere face oficiul de factor hormonal epifizar. Prezența sa în pineala bovinelor a fost semnalată mai întâi de Milcu și colab. (1963) și confirmată ulterior la porcine, ovine, șobolan, pisică, iepure și om. Arginin-vasotocina este un nonapeptid cu structură și proprietăți similare cu ale ADH hipofizar.

În afară de melatonină și arginin-vasotocină, epifiza conține și alte peptide active, inclusiv angiotensină (Coculescu și colab., 1977), formată local cu participarea unei enzime de tip renin, sensibilă la privațiunea de somn paradoxal, întuneric și lumină, precum și la variațiile presiunii osmotice a sângelui (Haulică și colab., 1974–1975).

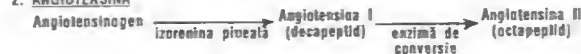
Majoritatea cercetătorilor admit în prezent că epifiza conține cel puțin două categorii de hormoni: indolici și peptidici (fig. 13.32).

Implicații fiziologice. Polimorfismul structural și biochimic al epifizei este dublat pe plan funcțional de o gamă variată de proprietăți fiziologice, care diferă de la o specie la alta. La mamifere, glanda pineală

1. MELATONINA



2. ANGIOTENSINA



3. VASOTOCINA (nonapeptid)

Fig. 13.32. Biosinteza și structura chimică a hormonilor indolici și peptidici epifizari.

nu și-a uitat total trecutul de organ senzorial și, deși nu mai posedă elemente fotosensibile, funcțiile sale sunt dependente de lumină.

Se știe de mult timp că lumina și întunericul influențează, prin intermediul epifizei, dezvoltarea și funcțiile ciclice ale organelor sexuale. Influențarea gonadelor de către lumină se realizează prin hipofiză cu ajutorul hormonilor epifizari, ale căror sinteză și eliberare prezintă mari variații nictemerale. Astfel, în timp ce nivelul melatoninei apare scăzut în timpul zilei și crescut în timpul nopții, arginin-vasotocina prezintă variații diurne inverse cu răsunetul morfo-funcțional corespunzător asupra gonadelor masculine sau femele. Prolungirea perioadei de iluminare zilnică, de exemplu, la șobolanca adultă, determină creșterea greutateii ovarelor și a predispoziției la estru precoce. Lumina continuă poate induce chiar estru permanent la rozătoare.

La masculii, expunerea la lumină de lungă durată produce hipertrofie testiculară, în timp ce întunericul produce involuția testiculelor. Extirparea pinealei, prevenind atât hipertrofia, cât și involuția testiculară, demonstrează participarea acesteia la reglarea activității gonadelor. Ajustările ciclurilor reproductive sezoniere se datorează, la multe mamifere, sincronizării activității sexuale cu fazele ciclului solar, pentru a asigura nașterea și dezvoltarea puilor în sezonul cald. Rolul gonadal al epifizei, întrevăzut de clinicieni și demonstrat de experimentări, este astfel unanim admis în prezent.

Structura și funcțiile organelor sexuale primare și secundare ale mamiferelor sunt sub influența activității secretorii a glandei pineale. În general, hiperfuncția epifizară se însoțește de pubertate întârziată, iar hipofuncția, de pubertate precoce. Punctul de impact al secreției pineale cu funcțiile gonadale îl constituie complexul hipotalamo-hipofizar, asupra căruia hormonii epifizari acționează în sens inhibitor. Atât melatonina, ca principal hormon epifizar, cât și arginin-vasotocina exercită un puternic efect antigonadotrop, realizat prin intermediul hipotalamusului, ca urmare a inhibării factorului de eliberare a gonadotropinelor hipofizare. Prin-un mecanism similar, hormonii epifizari inhibă secreția de ACTH și de hormon tireotrop, însoțită de scăderea funcției secretorii a corticosuprarenalelor și tiroidei.

După cum se vede, rolul endocrin al epifizei diferă de al celorlalte glande cu secreție internă. Hormonii indolici (melatonina) și peptidici (arginin-vasotocina, angiotensina, factorul antigonadotrop, factorul hipoglicemic, TRH, LRH, somatostatina etc.) eliberați în sânge sau LCR nu acționează asupra organelor-țintă periferice, ci prin intermediul funcțiilor nervoase din diencefal și, mai ales, al complexului hipotalamo-hipofizar. Receptorii sensibili la acțiunea hormonilor epifizari găsindu-se în structurile periventriculare diencefalice, glanda se comportă mai mult ca un „regulator al reglătorilor”, decât ca organ de comandă și control direct al unor teritorii efectoare periferice, cum este teritoriul gonadal (fig. 13.33).

Spre deosebire de hipofiză, glanda pineală îndeplinește rol de traductor neuro-chimic cerebral al informațiilor sosite la nivelul structurilor diencefalice, implicate în procesele de integrare neuro-endocrine. Diverșii stimuli externi (lumină, întuneric, stres etc.) influențează secreția epifizară pe cale predominant simpatică, punând în funcție un mecanism reglator accesoriu. Suprașupra celui care stă la baza reglării intrinseci, dependentă de factorii ai mediului intern. Prin-un astfel de mecanism, epifiza realizează modularea principalelor secreții neuro-endocrine și adaptarea lor la condițiile impuse de mediul extern, îndeplinind rolul unui veritabil ceas biologic. Prin efectele lor neuro-sedative, atât melatonina, cât și arginin-vasotocina par să contribuie la inducerea fazei paradoxale de somn profund. Pe de altă parte, melatonina este implicată în reproducere, iar sistemul renină-angiotensină în reglarea ingestiei de apă și a secreției de aldosteron.

Reglarea secreției hormonale epifizare. Se efectuează pe cale predominant nervoasă, cu participarea sistemului simpatico-adrenergic. Variațiile determinate de întuneric și lumină sau de diversele suprasolicități simpatică influențează, prin noradrenalina eliberată, procesele de formare și eliberare a melatoninei.

Integritatea inervației simpatică constituie de altfel condiția obligatorie a producerii variațiilor nictemerale ale serotoninei și melatoninei din epifiză. Simpatectomia chimică, provocată de 6-hidroxi-dopamină sau reserpină, produce, ca și gangliotomia simpatică cervicală bilaterală, o veritabilă pinelectomie funcțională, datorită spoliei de noradrenalina a terminațiilor simpatică epifizare. Ca principal mediator simpatic, noradrenalina stimulează activitatea N-acetil transferazei, favorizând transformarea serotoninei în N-acetilserotonină și melatonină. În cursul nopții, conținutul în noradrenalină al terminațiilor simpatică-epifizare crește, atrăgând după sine activarea biosintezei de melatonină. Odată cu apariția luminii, noradrenalina scade datorită eliberării sale intense, urmată de inactivarea rapidă cu consecință respectivă asupra sintezei de melatonină. Acțiunea stimulatorie a noradrenalinei se realizează prin mecanismul activării adenilat ciclazei membranare și formării de cAMP, necesar sintezei de N-acetil transferază. Conținutul în melatonină al epifizei depinde, în ultimă instanță, de cantitatea de N-acetilserotonină sintetizată de către N-acetiltransferază sub influența noradrenalinei.

Secreția de melatonină este influențată și de hormoni sexuali, prin fenomene de *feed-back* pozitiv și negativ, gonado-pineali. Factorii neuro-umoral de reglare a secreției de arginin-vasotocină și angiotensină sunt insuficient studiați.

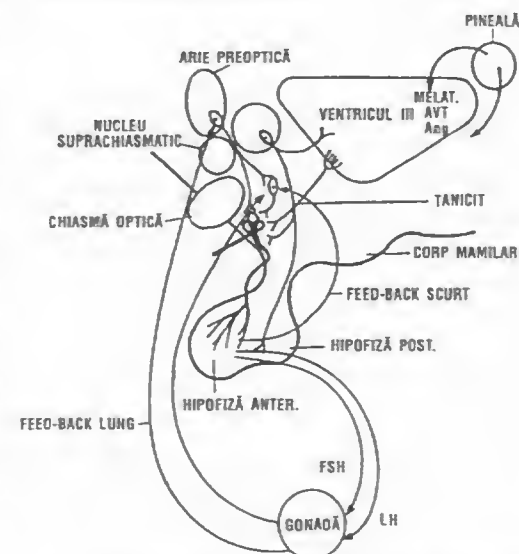


Fig. 13.33. Influențe epifizare asupra axului hipotalamo-hipofizo-gonadal.

13.8. TIMUSUL

Cercetările asupra timusului, ca organ endocrin indispensabil prelucrării și maturării limfocitelor T implicate în imunitatea celulară, au dus la descoperirea unei întregi familii de peptide hormonale timice, denumite inițial timozine.

Timozinele. Dintre acestea, mai bine studiată este timozina alfa-1. Ea se formează din protimozină alfa, este constituită din 28 de aminoacizi și are greutatea moleculară de 3 108 daltoni. Concentrația sa plasmatică crește în perioada inițială a lactației pentru a asigura dezvoltarea imunității nou-născutului și scade odată cu vârsta. Principala acțiune a timozinei alfa-1 constă în stimularea diferențierii markerilor specifici limfocitelor T de tipul dezoxinucleotidil transferazei, în vederea creșterii răspunsurilor mitogene, proliferării și maturării acestora. Administrarea ei la șoarece crește frecvența reacțiilor mitogene și producerea de interleukină-2 a limfocitelor T.

Spre deosebire de timozina alfa-1, timozinele beta-1 și beta-4 acționează în sens stimulator nu numai la nivel timic, ci și asupra măduvei osoase.

În cazul timozinei beta-4 s-au pus în evidență efecte de stimulare și a factorului eliberator de LH hipofizar, cu consecințe funcționale importante asupra funcției de reproducere (dezvoltare ovariană, stimularea ovogenezei etc.).

Timulina. Este un alt hormon timic cu structură peptidică și greutate moleculară mică. Formată numai din 9 aminoacizi, ea se găsește în plasmă legată de zinc. Activitatea sa de stimulare a markerilor de diferențiere se exercită atât asupra limfocitelor T, cât și a limfocitelor B. Timulina crește în oarecare măsură și activitatea celulelor NK (*Natural Killer*). ACTH și hormonii tiroidieni intensifică secreția de timulină, sugerând posibilitatea unor interrelații între hormonii hipofizari și sistemul imun în stres. Concentrația sa plasmatică este redusă în bolile autoimune, la pacienții cu SIDA și la persoanele subnutrite.

Administrarea timulinei s-a dovedit utilă în lupusul eritematos și poliartrita reumatoidă.

Timopoietina. Este, de asemenea, hormon timic de natură polipeptidică, prevăzută cu capacitatea de a induce diferențierea precoce a timocitelor imunoreglatoare de limfocite T periferice. Ea constituie capul de serie al unei familii de trei timopoietine. Spre deosebire de timopoietina I, care este formată din 49 de aminoacizi și are greutatea moleculară de 5 562 de daltoni, timopoietina III, denumită și tisplenină, fiind secretată de splină este mai puțin studiată. Administrarea timopoietinelor determină creșterea reacțiilor

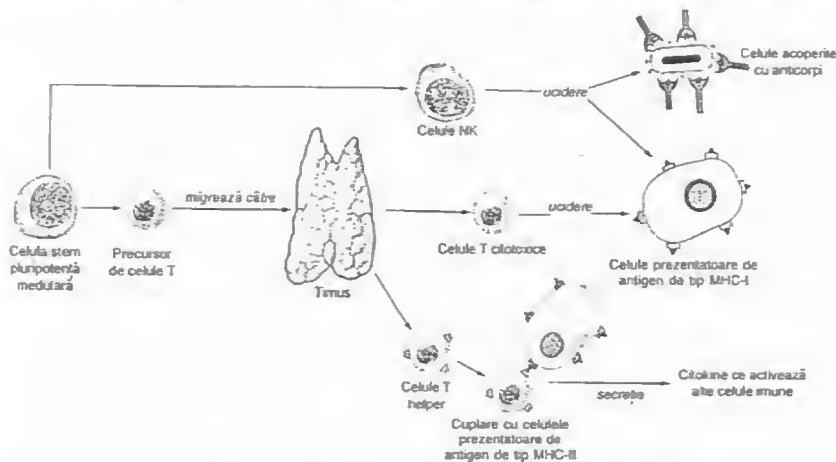


Fig. 13.34. Rolul timusului în maturarea și instruirea celulelor T helper și citotoxice.

imune și activitatea limfocitelor T helper. Activând complexul hipotalamo-hipofizar, timopoietinele stimulează secreția de ACTH și somatotrop, însoțită de creșterea cortizolului plasmatic.

Un factor umoral timic diferit de peptidele hormonale menționate, în structura căruia intră doar 8 aminoacizi, a fost recent izolat din timusul de vițel. Acesta crește producerea de interleukină-2 în splină și intensifică activitatea limfocitelor T la nivel celular. Astfel, factorul umoral timic realizează regresia infecțiilor virale și favorizează refacerea parametrilor imuni implicați în reacțiile de apărare imunitară normală.

Deși insuficiente, cunoștințele referitoare la structura și acțiunile hormonilor timici fundamentează conceptul actual de timus ca organ endocrin. Totodată, ele aduc noi dovezi clinico-experimentale în favoarea rolului determinant al timusului în realizarea reacțiilor de neuro-imunomodulare normale și patologice (fig. 13.34).

13.9. PROSTATA

În afara funcției de organ-țintă pentru hormonii gonadali masculi, prostata îndeplinește un rol neuro-endocrin insuficient studiat.

Începând din săptămâna a 12-a a vieții fetale, în mezenchimul uro-genital al fătului apar ca markeri specifici ai secreției prostatice o proteină acidă de tipul cromograninei A (CGA) și a antigenului specific prostatei (ASP), cu greutate moleculară de 33 000 daltoni și prevăzută cu proprietăți proteolitice de tip tripsin-like. Concentrația acestora crește progresiv în granulele secretorii ale epitelului uretral, prezentând postnatal aspecte de celule neuro-endocrine active, cu particularități histologice și imunoreactive proprii țesutului glandular prostatic (Degorge și Aunis, 1999). Pe această bază se atribuie în prezent prostatei umane o funcție neuro-endocrină neprecizată încă, de tip paracrin sau autocrin. Deocamdată, determinarea serică a ASP și, în mai mică măsură a CGA (întrucât se găsește și în alte neoplazii endocrine), constituie doar modalități utile de diagnostic sau prognostic al hipertrofiei de prostată.

Între timp serotonina și alte două proteine au fost identificate ca produși de secreție ai prostatei. Acestea sunt:

- proteina secretată de prostată (PSP-94, formată din 94 de aminoacizi) și
- proteina activă prostatică de 102 kilodaltoni prevăzută cu proprietăți de hidrolizare a proteinelor.

În afara lor, au fost puse în evidență și alte substanțe active, fără a li se stabili deocamdată funcțiile prostatice normale sau patologice (seminogelin, transferin, prostatin, TSH, imunoglobuline, leucin-aminopeptidaza etc.).

Amplu studiate sunt în prezent efectele glandelor endocrine asupra prostatei. Controlul endocrin al secreției și creșterii prostatice este asigurat de complexul hipotalamo-hipofizar și al testosteronului ca prohormon convertibil în dihidrotestosteron.

Ca principal hormon androgenic, acesta se găsește la nivel glandular în concentrație de 5 ori mai mare decât a testosteronului (5 ng/g țesut față de 1 ng/g țesut prostatic) și acționează prin intermediul unui receptor nuclear specific.

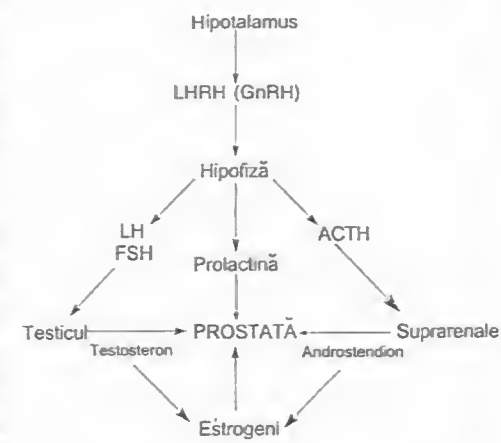


Fig. 13.35. Controlul neuro-endocrin al prostatei.

Hipotalamusul eliberează o mică proteină (10 aminoacizi), denumită hormon eliberator de LH (LHRH) sau hormon eliberator de gonadotropine (GnRH). În timpul stimulării LHRH, hipofiza eliberează LH, care este transportat la testicule, unde acționează asupra celulelor Leydig pentru a stimula sinteza steroizilor și eliberarea testosteronului, care devine androgenul major seric capabil să activeze creșterea prostatică.

Estrogenii, blocând indirect acțiunea androgenilor, realizează o adevărată castrare chimică. Prolactina pare a crește captarea androgenilor în prostată, afectând sinteza acidului citric ca principal blocant al ionilor inhibitori metalici.

Efectele glandelor endocrine asupra prostatei sunt schematizate în fig. 13.35.

Astfel, prostata, ca și alte țesuturi accesorii sexului masculin, este supusă controlului complex neuro-endocrin, în vederea menținerii formei, dimensiunilor și funcțiilor sale sexuale.

14. HORMONII LOCALI

În afara hormonilor circulanți secretați de glandele endocrine clasice, un rol important în autoreglarea marilor funcții dețin hormonii locali, ca produși de sinteză și secreție ai celulelor neuro-glandulare (derivate din creștele neurale) ale sistemului endocrin difuz, paracrin sau APUD. Acesta a fost identificat mai întâi în intimitatea epiteliului gastro-intestinal, pentru ca, ulterior, să i se demonstreze prezența în numeroase alte țesuturi și organe. Celulele paracrine posedă capacitatea de a capta precursori ai aminelor biogene și a-i decarboxila, în vederea formării de peptide prevăzute cu proprietăți stimulatorie sau inhibitorie asupra celulelor din jur (fig. 14.1). De aici și denumirea de celule APUD (*amine precursor uptake and decarboxylation*) dată de către Pearse (1966) celulelor neuro-glandulare din tubul digestiv, pancreas, plămâni, căi hepato-biliare, uro-genitale etc. Ulterior s-a precizat că și pe alte căi metabolice se pot forma hormoni locali la nivel celular, atât de natură proteică, cât și lipidică.

Asemenea celule formatoare de hormoni locali sunt larg răspândite în întregul organism, reprezentând cea de a treia cale efectoare, alături de căile somato-vegetative și endocrine clasice.

Produșii de secreție ai celulelor neuro-glandulare au structură aminică, polipeptidică sau lipidică.

Din prima categorie fac parte histamina, serotonina, octopamina și alte monoamine biogene.

În cea de a doua categorie au fost incluse toate peptidele biologic active rezultate din metabolismul propriu al diverselor țesuturi periferice și centrale, începând cu hormonii gastro-intestinali, kinele plasmatică și sistemul renină-angiotensină și sfârșind cu peptidele opioide, substanța P, neurotensina, neurokinina și altele. Datorită prezenței și eliberării lor în cantități variabile, multe din organele cu funcții înalt diferențiate, cum sunt creierul, inima sau plămânul, sunt considerate și organe endocrine.

Cea de a treia categorie de hormoni locali este reprezentată de derivații acizilor grași polinesaturați de tipul prostaglandinelor (PGA, PGE, PGF), prostacicinelor, tromboxanilor și leucotrienelor. În majoritatea celulelor APUD coexistă hormoni peptidici cu monoamine biogene (histamina, dopamina, serotonina), produși care sunt eliberați împreună, fie în circulație, cu rol endocrin, fie în

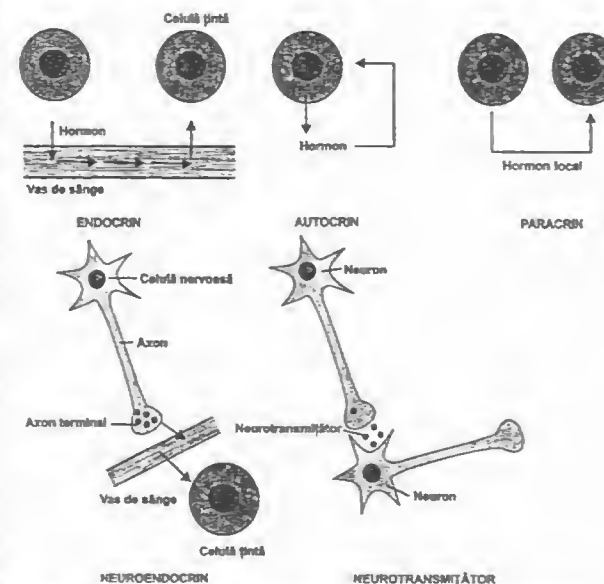


Fig. 14.1. Modalități diferite de transmisie a semnalelor chimice în organism.

spațiul interstițial, cu rol paracrin. Ipoteza sistemului APUD are meritul de a semnaliza și argumenta originea comună a celulelor care asigură atât controlul nervos, cât și endocrin al organismului, precum și existența aceluiași factori umorali în țesuturile: nervos, gastro-intestinal, miocardic, pulmonar, renal etc.

În același timp, această ipoteză oferă o mobilitate conceptuală în ceea ce privește potențialul multifuncțional al hormonilor APUD. De exemplu, peptidele opioide pot acționa ca neurotransmițători în sistemul nervos central sau periferic, ca hormon tradițional (clasic) după eliberarea din hipofiză și medulosuprarenală sau ca hormon paracrin în tractul gastro-intestinal.

În timp, denumirea de sistem neuro-endocrin difuz a fost criticată, întrucât nu toate celulele APUD au origine neuro-ectodermală. Astfel, sistemul de celule APUD gastro-intestinale este tipic endocrin, atât din punct de vedere histologic, cât și embriologic (nederivând din creștele neurale), mai adecvat fiind termenul de sistem endocrin difuz. Cu toată lipsa unui sistem cuprinzător de clasificare unanim acceptat, care să satisfacă din punct de vedere embriologic, morfologic și funcțional (situație justificată de altfel prin existența reală și frecvent greu de delimitat a interpătrunderii sau răspândirii difuze a celulelor cu potențial secretor endocrin), se poate considera că sistemul APUD prezintă o componentă centrală și o alta periferică, ambele eliberatoare de factori hormonal comun sau proprii teritoriului respectiv, prevăzuți cu acțiuni modulatorie locale sau la distanță.

14.1. MONOAMINELE BIOGENE

Dintre monoaminele biogene, mai bine cunoscute sunt histamina și serotonina.

Histamina este larg răspândită în aproape toate țesuturile regnului animal. Concentrația sa variază în funcție de specie și țesut. Cele mai mari cantități au fost găsite la iepuri (1–5 mg/ml sânge), iar cele mai reduse la câine (0,001–0,04 mg/ml sânge). Pisica, coihaiul și omul prezintă valori intermediare (0,02–0,08 mg/ml sânge). Pielea, mucoasa gastro-intestinală și plămânii conțin cele mai mari cantități de histamină la om. Principalul loc de sinteză, stocare și eliberare este mastocitul din adventicia vaselor sanguine. În afara histaminei mastocitare există și un stoc tisular nemastocitar de histamină. Acesta a fost identificat în mucoasa gastro-intestinală și în țesutul nervos cerebral.

Sinteza histaminei se realizează prin decarboxilarea histidinei cu ajutorul histidin decarboxilazei, care folosește piridoxal fosfatul drept coenzimă. Eliberarea sa din granulele mastocitare este determinată de către numeroși factori de agresiune tisulară, începând cu infecțiile, arsurile și reacțiile de hipersensibilitate mediată și sfârșind cu extractele proteice, veninurile și alte substanțe cu greutate moleculară mare (dextran, polivinilpirolidonă, curarizante, unele antibiotice etc.). Degranularea mastocitelor ca principală etapă a eliberării de histamină este calciu-dependență. În cazul terminațiilor neuronale, eliberarea histaminei apare condiționată de depolarizarea membranelor.

Acțiunile fiziolo-farmacologice ale histaminei sunt multiple. Ele se realizează prin intermediul a două tipuri de receptori histaminici, H_1 și H_2 . Spre deosebire de receptori histaminici de tipul H_1 , care stau la baza efectelor bronhoconstrictoare, uterine, intestinale și vasodilatatoare periferice, receptori H_2 sunt implicați în acțiunile gastrosecretorii. Acestea sunt utilizate în explorarea funcției secretorii a stomacului, descrisă la capitolul de fiziologie digestivă. Efecte secretagoge exercită histamina și la nivelul glandelor salivare și lacrimale, pancreasului, bronhiilor, intestinului și medulosuprarenalei.

Ca mediator chimic potențial al fibrelor senzitive histaminergice, histamina endogenă participă la producerea reacțiilor reflexe de axon și la apariția senzației de durere.

În calitate de hormon local, histamina mastocitară și nemastocitară contribuie la mecanismele de reglare a circulației din cursul reacțiilor hiperemice de apărare tisulară normală și patologică. Participarea ei a fost demonstrată atât în manifestările alergice locale și generale, cât și în fenomenele adaptative de tipul hiperemiei din efortul fizic, hipertermiei, inflamației etc. Tot ca hormon local, histamina stimulează musculatura netedă gastro-intestinală, bronșică și uterină, precum și unele secreții glandulare (gastrică, intestinală, pancreatică, salivară, lacrimală etc.).

Activarea receptorilor histaminergici produce modificări ale conținutului în nucleotide ciclice intracelulare. Prin intermediul receptorilor H_1 , blocanți de antihistaminice clasice, histamina activează adenilat ciclaza membranală, determinând acumularea de cAMP la nivel celular. Se pare că prin același mecanism se realizează efectele de tip H_2 (gastrinsecretorii), inhibitate de burimamidă și metiamidă.

La nivel central, histamina îndeplinește atât rol de mediator chimic hipotalamic, cât și modulator al activității și metabolismului cerebral. Activarea adenilat ciclazei de către histamină a fost observată în hipocamp, hipotalamus și neocortex. Unele antidepresante par să acționeze prin blocarea adenilat ciclazei sensibile la histamină.

Inactivarea histaminei endogene și exogene se realizează fie prin metilare, cu ajutorul imidazol N-metil transferazei prezente în cantități mari în mucoasa gastrică, fie prin dezaminare oxidativă, de către histaminaza (diaminoxidaza) tisulară sau plasmatică. Aceasta din urmă este crescută în cursul sarcinii.

Serotonina, enteramina sau 5-hidroxitriptamina, îndeplinește ca și histamină criterii atât de substanță neurotransmițătoare, cât și de hormon local. Faptul apare firesc dacă se au în vedere similitudinile structurale dintre celulele nervoase și endocrine, prevăzute în ambele cazuri cu proprietăți secretore. Principalele surse de serotonină la mamifere sunt celulele enterocromafine din mucoasa gastro-intestinală, mastocite și țesutul nervos cerebral. Spre deosebire de mastocite, care sunt capabile să producă serotonină, trombocitele fac doar oficiul de transport al acesteia.

Sinteza serotoninei rezultă din hidroxilarea triptofanului, urmată de decarboxilare. Blocarea triptofan hidroxilazei de către para-clorofenilalanină determină depleție de serotonină și insomnie. Spre deosebire de enzima hidroxilantă formatoare de 5-hidroxitriptofan, decarboxilaza acestuia (5-HT decarboxilaza) nu are caracter limitant. Stocarea la nivel celular se face în prezența ATP sub formă de vezicule granulare ușor degradabile de către reserpină și derivații săi. Pe această cale, reserpina provoacă depleție nu numai de catecolamine, ci și de serotonină. Eliberarea este calciu-dependență atât în cazul celulelor enterocromafine și al mastocitelor, cât și al neuronilor serotoninergici.

Acțiunile fiziolo-farmacologice ale serotoninei sunt numeroase și se produc prin intermediul receptorilor serotoninergici. Aceștia sunt de două tipuri: S_1 și S_2 . În timp ce receptori S_1 sunt responsabili de efectele vasodilatatoare ale serotoninei din teritoriile muscular și cutanat, receptori S_2 sunt vasoconstrictori arteriali și venoși în teritoriile splanhnic și pelvin. Pe această bază s-au introdus substanțele blocante de receptori S_2 de tipul ketanserinei în tratamentul hipertensiunii arteriale. Cele două tipuri de receptori serotoninici au fost identificate și la nivelul plachetelor, sistemului nervos, tubului digestiv și altor teritorii efectoare. Prin intermediul acestora, serotonina provoacă efecte de tip excitator sau inhibitor la nivelul diverselor țesuturi și organe.

Dacă efectele vasculare diferă în funcție de teritoriul vascular, asupra musculaturii netede digestive, uterine și bronșice exercită în mod constant acțiuni stimulante. Concomitent cu creșterea motilității gastro-intestinale, serotonina provoacă bronhoconstricție și vasodilație în segmentul cefalic și roșeața feței, caracteristică sindromului carcinoid (hipersecretor de serotonină). Fenomene similare de eliberare crescută a serotoninei au loc în cazurile de agresiune mastocitară și agregare plachetară. Serotonina astfel eliberată participă la reacțiile tisulare locale de tip capilaroconstrictor, contribuind la realizarea timpului vascular al hemostazei fiziologice.

Ca produs de secreție a celulelor paracrine din tubul digestiv, căile biliare, pancreatice și respiratorii, serotonina îndeplinește rol de hormon local și la distanță, prevăzut cu acțiuni predominant activatoare ale contractilității și secrețiilor respective. Efectele musculotrope ale serotoninei sunt antagonizate de metisergid, LSD, ciproheptadină etc.

La nivel central, serotonina este implicată în realizarea diverselor activități comportamentale. Urul sigur deține în geneza somnului cu unde lente, întrucât administrarea de precursori ai serotoninei induce somnul iar inhibarea sintezei acesteia cu para-clorofenilalanină determină insomnie (Jouvet, 1972). Efecte inhibitoare exercită serotonina și asupra structurilor simpatice și căilor nociceptive cerebro-spinale. Echilibrul serotonină-catecolamine cerebrale asigură menținerea presiunii sanguine, temperaturii corporale, ingestiei de alimente și activității psiho-afective în limite normale. Numeroase cercetări clinico-experimentale din ultimii 20 de ani indică existența unei corelații semnificative între comportamentul agresiv, autodistructiv (autoagresiune) și suicidal, pe de o parte, și concentrațiile scăzute la nivel central ale serotoninei, dopaminei și metaboliților acestora, pe de altă parte. Subiecții care prezintă alterări cu localizare paleocorticală a

turnover-ului metabolic al aminelor biogene se constituie ca un „grup de risc” din acest punct de vedere. Participarea serotoninei la elaborarea diferitelor forme de activitate neuro-psihică este sprijinită atât de efectele antidepressive ale imipraminei și iproniazidei, ca inhibitori ai inactivării sale de către MAO, cât și de proprietățile halucinogene ale blocării receptorilor serotonici din creier de către derivații acidului lisergic.

În afara serotoninei, la nivel cerebro-spinal există și alți derivați activi ai triptofanului. Dintre aceștia fac parte triptamina, 5-metoxitriptamina și melatonina (ca hormon pineal). Triptamina și 5-metoxitriptamina se găsesc mai ales în mezencefal. Coconcentrația 5-metoxitriptaminei este crescută în LCR al bolnavilor de schizofrenie acută și manie, iar administrarea sa intracisternală produce catatonie.

Dopamina, cunoscută ca neurotransmițător adrenergic, are în prezent și statut de neurohormon local. Eliberată de neuronii nucleului arcuat al hipotalamusului, deține ca funcție principală inhibarea eliberării de prolactină din lobul anterior hipofizar. Astfel, alături de celelalte căi centrale ale dopaminei (mezocorticală, mezolimbică și nigro-striată), calea tubero-infundibulară dopaminergică reprezintă o importantă cale de legătură între hipotalamus și hipofiză.

Substanțele blocante ale receptorilor pentru dopamină (de exemplu antipsihoticele) determină creșterea prolactinemiei și tulburări ale lactației, ciclului menstrual, cefalalgii și disfuncții sexuale. Aceste efecte sugerează implicarea dopaminei în reglarea stării de graviditate, a comportamentului maternal și a sensibilității senzitivo-senzoriale în general. Un rol similar, de inhibare a prolactinei, se atribuie dopaminei eliberate din hipofiza posterioară, alături de vasopresină și oxitocină.

O altă funcție modulatorie importantă este deținută de dopamina de la nivelul ganglionilor bazali, în controlul motilității. Scăderea acesteia de la nivelul căii nigro-striate determină apariția bolii Parkinson, cu afectarea capacității de control a tonusului muscular și a mișcărilor voluntare.

La nivelul lobilor frontali, dopamina controlează fluxul de informații ce ajunge la scoarță din alte zone cortico-subcorticeale. Alterările dopaminergice de la nivelul acestor regiuni cauzează declinul funcțiilor neurocognitive și, în special, a memoriei, atenției și capacității de rezolvare a problemelor.

Un loc aparte se atribuie dopaminei în sistemul comportamental de motivare pozitivă și negativă, ca factor de stimulare a dorinței de plăcere și de predicție a activităților plăcute. O astfel de participare este importantă și pentru comportamentul alimentar și sexual, cu consecințe negative asupra consumului de droguri de tipul cocainei și amfetaminelor, care inhibă recaptarea dopaminei, măbindu-i durata de acțiune la nivelul creierului.

Octopamina se găsește în majoritatea organelor prevăzute cu inervație simpatică, cu rol neprecizat încă. Ea este sintetizată din tiramină cu ajutorul dopamin beta-hidroxlazei și stocată în veziculele celulelor cromafine simpatice, reprezentând 5–10% din conținutul total de catecolamine. Eliberarea sa are loc simultan și în aceleași condiții cu catecolaminele din teritoriile presinaptice, sugerând rolul acesteia de cotransmițător sau modulator al mediației chimice simpatico-adrenergice. Localizarea subcelulară a octopaminei la nivelul terminațiilor simpatice nu exclude posibilitatea rolului său de fals mediator simpatic. Este sintetizată din aminoacidul tirozină sau tiramină. Este inhibitorie a enzimei MAO, stimulează atât receptorii α , cât și β -adrenergici, cu efecte antidepressive și antihipertensive.

14.2. HORMONII LOCALI PEPTIDICI

Perfecționarea continuă a tehnicilor de purificare, identificare și caracterizare a peptidelor biologice active a contribuit substanțial la cunoștințele actuale despre hormonii locali de natură peptidică. O mare parte dintre aceștia au fost prezentați deja, ca principali factori de autoreglare locală și generală a circulației, digestiei, excreției etc.

În cele ce urmează vor fi expuse principalele implicații funcționale privind sistemul renină-angiotensină, sistemul kininogenaze-kinine, hormonii gastro-intestinali, sistemul opiat endogen, substanța P, neurotensina și factorul natriuretic atrial.

14.2.1. SISTEMUL RENINĂ-ANGIOTENSINĂ

Sistemul renină-angiotensină (SRA) este unul din cele mai cunoscute componente ale sistemului APUD, cu roluri majore în reglarea hidroelectrolitică și cardio-vasculară a organismului. Au trecut aproape 100 de ani de la descrierea reninei de către Tigerstedt și Bergmao (1898) și cercetările privind implicațiile funcționale ale SRA atât de origine renală, cât și extrarenală reprezintă în continuare una din „zonele fierbinți” atât ale studiilor experimentale de fiziologie, cât și ale fiziologiei clinice. Având în vedere că SRA de origine renală a fost expus în capitolul Fiziologia aparatului excretor (biosinteza componentelor sistemului, roluri, reglare), vom prezenta mai întâi succint SRA sistemic, de origine predominant renală, insistând asupra acțiunilor fiziо-farmacologice ale angiotensinei II active. Acesta este un sistem enzimatic cu rol hormonal circulant, prevăzut cu acțiuni periferice și centrale bine cunoscute. Angiotensina II circulantă, ca produs final al SRA, este considerată un veritabil „hormon al homeostaziei hidroelectrolitice”, intervenind în reglarea aportului și eliminării de apă și electroliți. Efectele sale sunt datorate atât acțiunilor la nivelul musculaturii netede vasculare inclusiv renale, cât și la nivelul relațiilor funcționale ale SRA cu corticosuprarenala, medulosuprarenala, structurile nervoase-centrale, hipofiza și epifiza. Menținerea homeostaziei circulatorii se realizează prin efecte vasoconstrictoare intense și generalizate, asociate cu cele de conservare a apei și sodiului în organism.

Sintetic, funcțiile SRA ca sistem enzimatic formator de angiotensină II activă la nivelul diverselor țesuturi periferice cuprind următoarea enumerare:

a) Angiotensina II stimulează puternic contracția mușchilor neted vascular arterial, cu răspuns presor sistemic (de 40–50 de ori mai puternic decât al noradrenalinei), prin acțiune atât directă asupra fibrei musculare pe receptori specifici (A_1), cât și indirect, prin blocarea recaptării de noradrenalină de către terminațiile nervoase simpatice. Efectul asupra circulației venoase este mai slab, datorită densității scăzute a receptorilor angiotensinici. Acțiuni hipertensive ale angiotensinei au fost obținute și după administrarea centrală în circulația cerebrală sau intracerebro-ventricular; aria postrema bulbară, mezencefalul și hipotalamusul sunt considerate zone ale acțiunii preoare centrale determinate de peptid prin activarea unui mecanism adrenergic.

În cadrul acțiunii vasoconstrictoare generalizate, angiotensina intervine și în autoreglarea fluxului sanguin renal și a filtrării glomerulare în limitele variației valorilor presiunii arteriale cuprinse între 80–200 mmHg. În cazul în care SRA circulant are o activitate exagerată, ca urmare a ischemiei cronice a parenchimului renal, este posibilă apariția hipertensiunii.

b) Prin acțiune directă asupra zonei glomerulare a corticosuprarenalei, angiotensina stimulează biosinteza de aldosteron, cu care se află în relație de *feed-back*.

În același timp, peptidul angiotensinic activează și celulele cromafine ale medulosuprarenalei și, în consecință, determină eliberarea de catecolamine atât prin mecanism direct, cât și pe cale indirectă nervoasă centrală (după cum se va vedea mai jos).

c) Angiotensina II este un modulator al transmisiei nervoase parasimpatice și mai ales simpatice. Ea stimulează eliberarea de acetilcolină atât la nivelul celulelor ganglionare și terminațiilor nervoase colinergice periferice, cât și în sinapsele centrale. De asemenea, facilitează transmiterea simpatică prin acțiune pre- și postsinaptică, crescând sinteza și eliberarea de noradrenalină la nivelul atât al ganglionilor simpatici și al terminațiilor postganglionare adrenergice, cât și la nivel central.

La aceste efecte se adaugă acțiunea angiotensinei la nivelul terminațiilor nervoase simpatice, de potențare adrenergică prin mecanismul inhibării procesului de recaptare neuronală a mediatorilor simpatici.

Acțiunile stimulatorie cardiace ale angiotensinei sistemice (ca factor inotrop și cronotrop pozitiv) sunt, de asemenea, mediate în mare măsură de terminațiile nervoase postganglionare adrenergice.

d) Angiotensina II stimulează eliberarea atât de ADH neurohipofizar, cât și de ACTH adenohipofizar; ultima acțiune se realizează prin intermediul CRF hipotalamic ca activator al eliberării de hormon adrenocorticotrop.

e) Angiotensina activează comportamentul dipsogenic și ingestia de apă prin mecanismul stimulării organului subfornic periventricular și a centrului hipotalamic al setei.

SRA, deși este bine reprezentat la nivelul țesutului renal, asigurând suficiente cantități de angiotensină II circulantă în organism, acest sistem se află răspândit și în alte țesuturi și organe ca: vase, cord, glandă

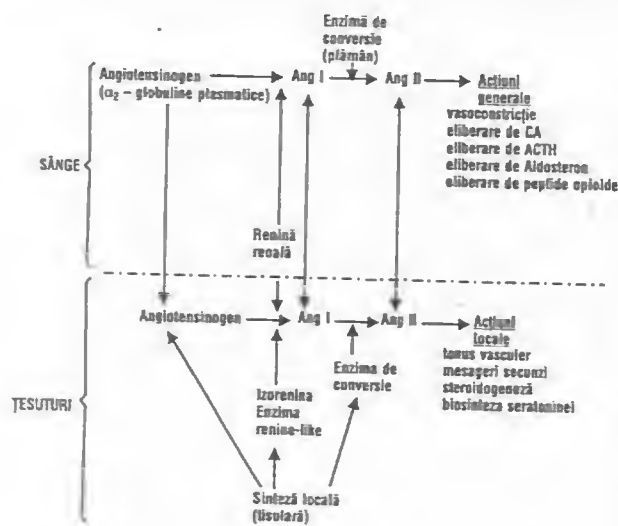


Fig. 14.2. Sistemul renină-angiotensină sanguin și tisular.

suprarenală, creier și glande anexe (hipofiză și epifiză), glandă submaxilară, uter, placenta, lichid amniotic etc. Acestea conțin toți factorii necesari sintezei locale de angiotensină (Ang II activă (fig. 14.2).

Îndeplinind toate criteriile de reprezentare (biologice, chimice și radioimunologice) ale unui sistem hormonal local, sistemul intrinsec renină-angiotensină a fost recunoscut ca o entitate distinctă, proprie diverselor țesuturi și organe, iar angiotensina II a căpătat statut și de hormon local. Astfel a apărut noțiunea de SRA tisular cu rol paracrin și autocrin.

O importanță aparte prezintă SRA de origine cerebrală și cardiovasculară. Existența sistemului renină-angiotensină de origine cerebrală a fost demonstrată pentru prima dată de către Ganten și colab. (1970), pe de o parte, și de Fischer-Ferraro și colab. (1970),

pe de altă parte, în numeroase structuri nervoase: scoarță cerebrală, trunchi cerebral și hipotalamus. Extinzând cercetările la nivelul altor structuri centrale, colectivul nostru a semnalat prezența SRA în glandele anexe cerebrale, hipofiză și epifiză. Alături de acțiunile angiotensinei circulante la nivelul sistemului nervos și glandelor anexe (efect dipsogenic, stimularea eliberării de ADH și ACTH), SRA intrinsec cerebral are propriile sale acțiuni și roluri, similare și diferențiate. Există un volum imens de date care pledează pentru angiotensina II cerebrală ca având rol atât de neurotransmițător local, cât și de neurohormon, cu acțiune modulatorie de tip „acord fin” (tuner) a diferitelor procese fiziologice centrale. Distanța dintre zonele de eliberare și receptori fiind mai scurtă decât pentru Ang II sistemică, acțiunile sunt mai rapide.

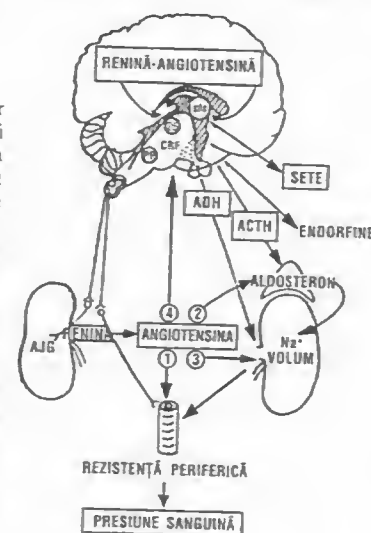
Enumerativ, Ang II din creier are cel puțin patru roluri, și anume:

- a) Rol de hormon presor și reglator al homeostaziei hidroelectrolitice (reglarea volumelor lichidiene ca răspuns la hipovolemie), cu implicații în controlul presiunii arteriale și boala hipertensivă.
- b) Rol în eliberarea unor hormoni hipofizari (ACTH, ADH, prolactină, ocitocină) și în reproducere (ciclul menstrual).
- c) Rol de neurotransmițător sinaptic, interacționând cu serotonina, catecolaminele, prostaglandinele, peptidele opioide și alte peptide.
- d) Rol în modularea unor funcții nervoase înalte, asociate actelor comportamentale: motivația (setea, durerea), memoria, posibil învățare și controlul motricității.

Există date care sprijină rolul Ang II cerebral ca factor de menținere atât a echilibrului ionic neuronal, prin activarea ATPazei membranare, cât și a balanței hidroelectrolitice generale, prin acțiunile ADH eliberatoare și dipsogene, acționând conjugat cu sistemul renină-angiotensină periferic (fig. 14.3).

Ambele sisteme se completează reciproc prin intermediul verigilor reno-corticosuprarenale (modularea filtrării glomerulare și secreției de aldosteron) și hipotalamo-hipofizare (eliberarea de ADH și ingestia de apă), ducând la creșterea cantității de lichide din organism prin retenție de sodiu, apă și aport hidric. În timp ce SRA cerebral inițiază setea hiperosmotică, SRA de origine periferică favorizează declanșarea setei hipovolemice. Ang II cerebrală pare implicată mult mai puternic în mecanismul setei (comparativ cu Ang

Fig. 14.3. Efecte centrale și periferice ale SRA. AJG, aparat juxta-glomerular, sfo, organ subfornical, ns, nucleu supraoptic, ap, aria postrema. 1, 2, 3, 4, acțiunile angiotensinei.



II periferică), prin acțiunile sale dovedite asupra receptorilor specifici din organul subfornical, organul vascular al laminei terminale, nucleul supraoptic, nucleul preoptic median și aria postrema, cu un rol important în homeostazia volemică; acest tip de acțiune este inhibat de stimularea receptorilor de întindere auriculară eliberatori de factor natriuretic atrial (ANF). Ang II circulantă ar participa la producerea setei prin concentrații mult mai înalte și în situații extreme, cum sunt deshidratarea intensă și hipovolemia severă.

Comportamentul la sete implică, de asemenea, activitate motorie și memorare. Unele din structurile nervoase răspunzătoare de aceste funcții, precum nucleul olivar și respectiv hipocampus, prezintă receptori pentru Ang II, dar mecanismele de intervenție ale acestora nu sunt încă precizate.

Un număr mare de experimente au arătat că administrarea intracerebrală de Ang II determină răspunsuri presoare asociate cu efecte dipsice și antiuretice prompte, răspunsuri care pot fi inhibitate cu blocați ai receptorilor angiotensinici, de tipul saralazinei.

În aceste acțiuni presoare sunt implicate structurile nervoase participante la realizarea homeostaziei volemice enumerate mai sus. Apare astfel justificată atribuirea unui anumit rol Ang II cerebrală și în producerea hipertensiunii arteriale.

Mecanismul de realizare a efectului presor de către Ang II endocraniană este declanșat nu numai de hiperosmoza eliberatoare de ADH și activatoare a dipsogenezei, ci și prin alte acțiuni asociate: creșterea activității simpatică și inhibarea activității haroreflexe a nucleului tractusului solitar.

Spre deosebire de Ang II circulantă, cea cerebrală are și unele acțiuni diferite. Astfel, în timp ce Ang II sistemică prezintă efecte antinatriuretice, Ang II din creier favorizează inhibarea eliberării de aldosteron și natriureza; ea stimulează în același timp apetitul pentru sodiu, ca măsură de tamponare a scăderii acestui ion în organism, în final balanța sodică rămânând echilibrată.

În acest mod, Ang II cerebrală crește ingestia de Na în hipovolemie și controlează, în același timp, nivelul de Na din creier.

O altă grupă de efecte ale SRA cerebrală sunt cele legate de modularea transmisiei sinaptice centrale. Acest rol este dovedit atât de prezența reninei în structurile neuronale sinaptosomale, cât și de cercetări care au arătat creșterea frecvenței de descărcare în aplicările directe de Ang II pe neuronii din nucleii supraoptici și organul subfornical.

Ang II din structurile nervoase centrale stimulează eliberarea și turnover-ul noradrenalinei din nucleul tractusului solitar, nucleul comisural, nucleul motor al vagului și al dopaminei în eminența mediană; răspunsul catecolaminic la Ang II este dependent de încărcarea cu sodiu a organismului și are implicații în controlul presiunii arteriale (creșterea noradrenalinei în LCR urmărește paralel creșterea presiunii arteriale).

Aceste efecte sunt specific mediate de Ang II cerebrală; mai mult, s-au pus în evidență relații de tip feed-back neuronal între receptori noradrenergici și cei angiotensinergici. SRA cerebrală are relații funcționale și cu axa hipotalamo-hipofizo-gonadală. În cursul ciclului estral, cercetările de laborator au arătat scăderea apetitului pentru apă și reducerea numărului de receptori angiotensinici în aria preoptică, hipotalamusul lateral, bulbul olfactiv și hipofiză; în contrast, efectele periferice ale estrului sunt de creștere a angiotensinogenului plasmatic și a numărului de receptori uterini pentru angiotensină. Se apreciază că de modificările menționate sunt răspunzători estrogenii, administrarea acestora determinând efectele mai sus prezentate.

Un alt aspect privind rolurile Ang II din creier și organele anexe este cel referitor la SRA epifizar. Concentrațiile mari în renină-angiotensină la nivelul pinealei, variațiile nictemerale ale acestui sistem în manieră analogă cu cele pentru noradrenalină și melatonină, cât și numeroasele relații de interdependență între acești factori (Ang II cerebrală crește doz-dependent sinteza de serotonină, lipsa serotoninei deprimă răspunsul presor la Ang II) au pus problema implicării Ang II din creier în ritmul diurn alături de serotonină și, mai mult chiar, a rolului său posibil de nou hormon epifizar.

La nivel cerebral s-au semnalat interrelații și între Ang II și opiați. Astfel, encefalinele, beta-endorfinele și morfina inhibă efectele Ang II administrate intracerebral, în timp ce naloxonul (antagonist opiat) anulează această acțiune, potențând chiar efectele presoare ale Ang II.

Ipoteza existenței unor corelații funcționale între angiotensina din creier și opiații endogeni este sprijinită și de observațiile privind implicarea acestora în analgezie.

În ceea ce privește relațiile dintre Ang II cerebrală și cea sistemică, ele sunt dictate de faptul că în mod normal bariera hemato-encefalică previne pasajul Ang II periferice la receptorii din creier, excepție făcând doar eminența mediană, aria postrema și organele circumventriculare (organul subfornical și organul vascular al laminei terminale).

În concentrații mici, Ang II sistemică activează numai receptorii cerebrali lipsiți de barieră, însă, la concentrații înalte, peptidul difuzează, activând receptori care în mod obișnuit sunt stimulați numai de Ang II cerebrală.

Unul din sistemele renină-angiotensină cu largi implicații clinice este și cel de origine cardiovasculară. Prezența unei activități renin-like în cord a fost semnalată în 1970 de Hayduk și colab., ulterior punându-se în evidență toate componentele SRA în majoritatea structurilor cardio-vasculare.

Atât mușchiul cardiac, cât și musculatura netedă vasculară conțin toți factorii necesari sintezei locale de Ang II.

Precursorul și enzimele implicate (renina, angiotensinogenul, enzima de conversie) posedă expresie genetică (existența ARN mesager specific), reușindu-se clonarea și identificarea distribuției lor celulare.

Concentrațiile cele mai mari de Ang II de origine cardiacă se găsesc în ordine descrescătoare în: atrul drept, atrul stâng, septul interventricular, ventriculul stâng. SRA miocardic participă la autoreglarea și modularea activității inimii, adaptând-o la necesitățile organismului, prin următoarele acțiuni biologice:

a) Efecte inotrop și cronotrop pozitive datorate creșterii conductanței transmembranare pentru calciu și duratei fazei în platou a potențialului membranar de acțiune a miocitelor.

b) Stimularea creșterii fibrelor miocardice și a musculaturii netede vasculare.

c) Acțiune coronarconstrictoare (factor de reglare locală a circulației coronariene).

Dovezile experimentale privind rolurile enunțate au stat la baza introducerii în terapia insuficienței cardiace a inhibitorilor enzimei de conversie cu efecte favorabile atât asupra forței de contracție a miocardului, cât și asupra circulației coronariene. În prezent, inhibitorii secreției de renină și ai enzimei de conversie sunt utilizați pe scară largă atât în tratamentul hipertensiunii arteriale, cât și al insuficienței cardiace congestive.

14.2.1.1. Noi angiotensine bioactive

Un important pas înainte s-a făcut în ultimile decenii odată cu descoperirea atât a unor noi enzime angiotensin-formatoare, cât și a altor peptide angiotensinice bioactive. În afara reninei secretate de AJG renal, o activitate renin-like a fost descoperită în numeroase țesuturi și organe, întregite de tonină și catepsinele D și G transformatoare ale angiotensinogenului inactiv în Ang I (1-10), precum și de chimază și cele două enzime de conversie (ACE_1 și ACE_2), generatoare de Ang II (1-8), Ang III (2-8) și Ang 1-7. Activitatea enzimatică a acestora este continuată la nivel tisular de către aminopeptidaze, carboxipeptidaze sau endopeptidaze, realizând biosinteza altor peptide active (Ang 3-8; Ang 3-7; Ang 1-5) rezultate din inactivarea Ang II și prevăzute cu proprietăți similare sau diferite de ale substanței de bază. Schema de ansamblu a participării enzimelor formatoare și inactivante de angiotensine bioactive la nivel circulant și tisular este următoarea (fig. 14.4):

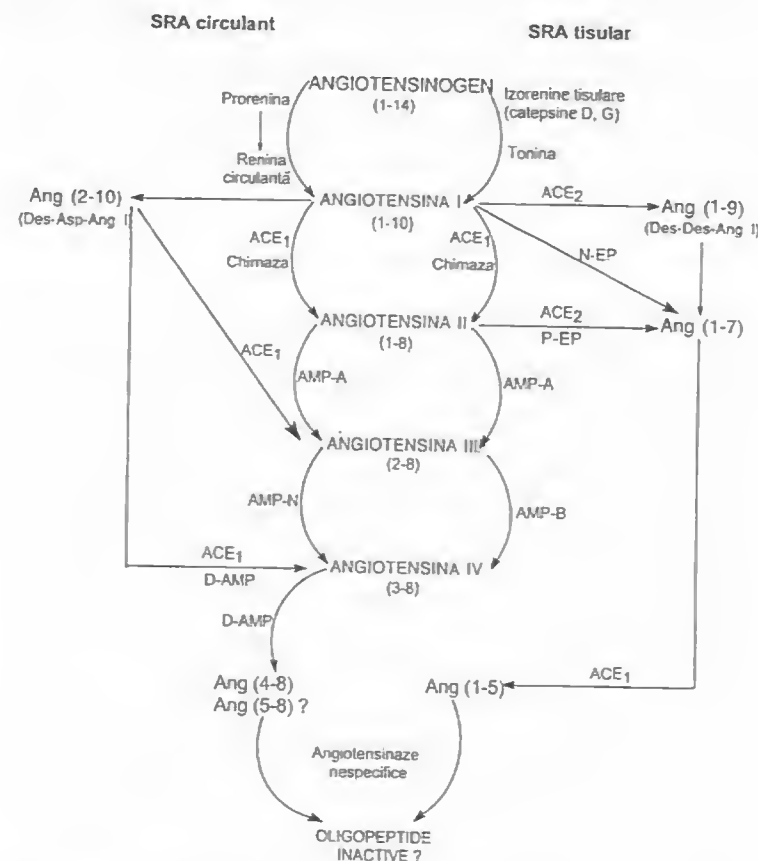


Fig 14.4. Căile enzimatică de generare a angiotensinelor bioactive. ACE_1 , enzima de conversie a angiotensinei I (dipeptidilcarboxipeptidază). ACE_2 , enzima de conversie a angiotensinei II (carboxipeptidază). AMP-A, aminopeptidaza A. AMP-B, aminopeptidaza B. AMP-N, aminopeptidaza N. D-AMP, dipeptidilaminopeptidaza. N-EP, endopeptidaza neutră (neprilizin). P-EP, prolilendopeptidaza.

Cascada enzimatică a generării de angiotensine active a fost întregită de ample cercetări referitoare la acțiunile fizio-farmacologice ale acestora la nivelul diverselor țesuturi și organe. Au fost identificați receptori specifici angiotensinelor respective, precum și mecanismul diferit de acțiune în unele cazuri.

S-a precizat printre altele că efectele Ang II se realizează prin intermediul receptorilor AT_1 și AT_2 . În timp ce receptorii AT_1 mediază majoritatea proprietăților fiziologice ale Ang II, receptorii AT_2 contracarează o mare parte din acțiunile acestora produse prin stimularea receptorilor AT_1 . Este cazul efectelor cardio-vasculare, proliferative și anti-diuretice. Acțiuni parțial comune cu ale Ang II de tip AT_1 , mai posedă doar Ang III (2-8) și Ang V (3-7).

Atât Ang IV (3-8), cât mai ales Ang 1-7 acționează în sens vasodilatator, diuretic, natriuretic și antiproliferativ, contribuind la reacțiile de contracarare și contrareglare în vederea îndepărtării dezechilibrelor create de stimularea predominantă vasoconstrictoare a stimulării receptorilor AT₁ de către Ang II circulantă. În cazul Ang IV predomină acțiunile nervoase centrale asupra proceselor de memorare și învățare, în timp ce Ang 1-7 acționează în mod predominant periferic. Astfel, sistemul renină-angiotensină, ca sistem hormonal, s-a dovedit a fi mult mai complex decât s-a considerat inițial. Angiotensina II rămâne însă principalul hormon circulant și tisular prevăzut cu acțiuni endocrine generale, paracrine și autocrine locale, dar efectele sale centrale și periferice sunt modulate, întregite sau contracarate de o parte din producții săi de metabolizare.

14.2.2. SISTEMUL KININOGENAZE-KININE

Descoperirea kaliceinei în urină de către Frey și colab. (1928) a constituit începutul cercetărilor consacrate sistemului enzimatic din țesuturi, prevăzut cu capacitatea de a elibera substanțe biologice active în plasmă, capabile să contracte musculatura oedată intestinală, de unde și denumirea dată acestora de kinine plasmatică. Considerată inițial hormon pancreatic, kaliceina s-a dovedit ulterior o enzimă tisulară care face parte din categoria serin-proteazelor, împreună cu tripsina, chimotripsina, elastaza, trombina, plasmina etc. Pentru că toate aceste enzime posedă proprietăți proteolitice formatoare de kinine plasmatică, au fost denumite kininogenaze. Ele au fost puse în evidență în plasmă, pancreas, rinichi, tubul digestiv, mucoasa bronșică, glandele salivare și sexuale etc. Din punct de vedere chimic, kininogenazele sunt glicoproteine baze, prezente în numeroase țesuturi și organe sub formă inactivă, de precursori. Activarea lor are loc sub influența pH-ului, temperaturii, diluțiilor, solvenților organici, suprafețelor rugoase, veninurilor de șarpe sau insecte, reacției antigen-anticorp, factorului Hageman (XII a) al coagulării etc. Forma activă a kininogenazelor manifestă o înaltă specificitate de substrat asupra alfa₂-globulinelor plasmatică, denumite kinioogeni, din care rezultă kininele active propriu-zise. Astfel, s-a ajuns la descrierea sistemului kininogenaze-kinioogen-kinine și la descoperirea unor inhibitori naturali ai acestuia.

În cazul kaliceinei s-a precizat că aceasta este o glicoproteină larg răspândită în țesuturile și umorile organismului, cu greutate moleculară de 100 000 de daltoni. Ea se găsește sub formă de precursor inactiv (kaliceinogen), ușor activabil în prezența factorilor chimici și fizici mai sus-menționați.

În timp ce kaliceina activă din plasmă determină formarea de bradikinină, kaliceinele tisulare formează din același substrat și kalidină sau metionilkalidină. Specificitatea substratului plasmatic (kinioogenul) este asigurată de configurația spațială a resturilor aminoacidice – histidină, serină și acid aspartic, ale grupării active. La rândul său, inhibitorul proteazic polivalent capabil să inactiveze și kaliceina este format din 58 de aminoacizi, are greutate moleculară de 6 500 și a fost comercializat sub formă de trasylol. Atât kininogenul, cât și inhibitorul proteazic al kaliceinei pot prezenta defecte congeoitale, însoțite de alterări funcționale ale sistemului kininogen-formator. După eliberare, kininele plasmatică sunt inactivate de către două kininaze prezente în plasmă, limfă și țesuturi. Una dintre acestea este identică cu enzima de conversie a angiotensinei I inactive în angiotensina II activă.

În linii mari, factorii activatori și inhibitori ai kininelor plasmatică sunt prezentați în fig. 14.5.

Fenomenul în cascadă, de activare a kaliceinei și transformare a kininogenului inactiv în kinine biologice active, duce la formarea de bradikinină, kalidină și metionilkalidină.

Bradikinină conține 9 aminoacizi, kalidina este formată din 10 aminoacizi, iar metionilkalidina din 11 aminoacizi. În cazul bradikininei, secvența lor este: Arg-Pro-Gly-Phe-Ser-Pro-Phe-Arg-. La aceștia se adaugă lizina în cazul kalidinei și metionina în cazul metionilkalidinei.

Implicațiile funcționale ale kininelor plasmatică sunt multiple datorită acțiunilor fiziо-farmacologice la doze extrem de mici. Ele produc vasodilatație, creșterea permeabilității capilare, diapedeză, edem, contracția musculaturii netede extravasculare, iritația terminațiilor nervoase senzitive etc. Între efectele celor trei plasmakinine nu sunt decât diferențe cantitative. Astfel, kalidina exercită doar jumătate din activitatea bradikininei pe ileonul izolat de cobai, în timp ce efectele hipotensoare sunt de 2-3 ori mai puternice la iepure și șobolan. În general, proprietățile vasodilatatoare sunt de aproximativ 10 ori mai intense decât ale histaminei.

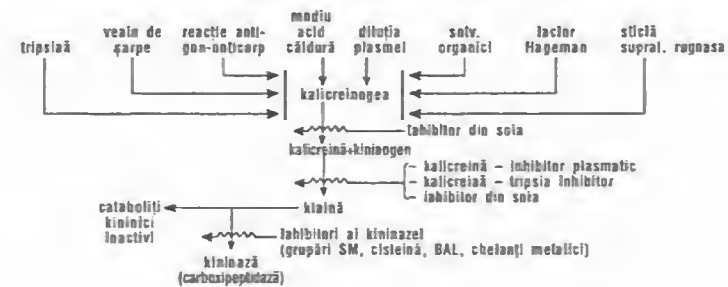


Fig. 14.5. Factorii activatori și inhibitori ai formării de kinine plasmatică.

Injectate intravenos la om, kininele plasmatică produc roșeața tegumentelor și dilatarea vaselor din mușchi, creier, rinichi, coronare etc. Adeseori provoacă durere de cap pulsatilă. Efectele dilatatoare sunt consecința acțiunii directe asupra musculaturii oedate prevăzute cu receptori specifici. Aceștia sunt de cel puțin două tipuri: B₁, prezenți în vase, și B₂, în musculatura netedă a tubului digestiv. Prin acțiunile dilatatoare de la nivelul teritoriului arteriolo-capilar, plasmakininele participă la realizarea hiperemiei funcționale a organelor în stare de activitate (glande exocrine, inclusiv cele sudorale, musculatura scheletică, miocard etc.). Există o adevărată competiție între polipeptidele vasoactive dilatatoare de tipul bradikininei, pe de o parte, și cele constrictoare de tip angiotensinic, pe de alta, cu rol determinant în autoreglarea tonusului arteriolo-capilar (fig. 14.6).

Competiția se realizează atât la nivel de substrat alfa₂-globulinic, cât și la nivel de enzime de conversie cu rol dublu de formare a angiotensinei II active și de inactivare a bradikininei, ca principală kinioă plasmatică. Factorii activatori ai sistemului kininogenaze-kininogen-kinioă exaltă concomitent și activitatea sistemului intrinsec renină-angiotensină de către kaliceină, ca activator al proreninei și formării de renină.

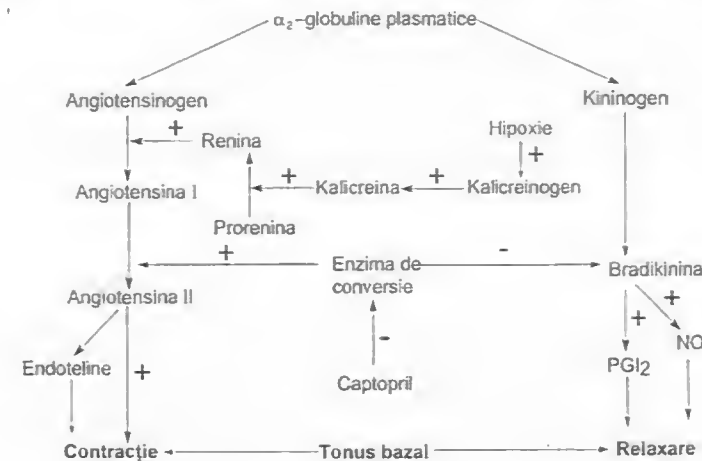


Fig. 14.5. Interrelații SRA-kininogen-bradikinină la nivel vascular.

În afara implicațiilor vasculare, un rol important revine sistemului kininogenaze-kininogen-kinine plasmatice în realizarea fibrinolizei. Activarea factorului XII al coagulării prin contactul cu colagenul subendotelial expus declanșează atât formarea activatorului extrinsec al protrombinei, cât și activarea kaliceinei. Aceasta din urmă este realizată de un activator peptidic al prekalicreinei (kaliceinogeno), rezultat din scindarea proteolitică a factorului XII activat. Același peptid participă la transformarea proactivatorului plasminogenului în plasminogen activ, formator de plasmină. În felul acesta se realizează atât vasodilatația kininică, cât și fibrinoliza plasminică. La rândul lor, plasmioa și kaliceina stimulează activarea factorului XII-Hageman și formarea activatorului prekalicreinei, realizându-se astfel relații de tip *feed-back* pozitiv și negativ între cele două căi (fig. 14.7).

În afara interferențelor cu sistemul fibrinolitik și coagulant, plasmakinioele sunt implicate în reglarea funcțiilor renale. Activând sinteza intrarenală de prostaglandine, kininele plasmatice exercită, împreună cu acestea, efecte comune de facilitare a excreției de apă și electroliți.

Injectarea intraarterială de bradikinină determină creșterea diurezei și natriurezei, iar anticorpii anti-bradikinină inhibă ambele efecte ale acesteia. Pe această bază s-a emis ipoteza participării kininelor plasmatice la reglarea fiziologică a natriurezei. Modificări importante ale sistemului kininogenoformator se produc, de asemenea, în cursul ciclului estral, al sarcinii și parturii. Kininogenol plasmatic, de exemplu, se dublează în sarcină și revine la normal după naștere. Activarea kaliceinogenoului la naștere determină eliberare de kinine cu rol în adaptarea circulației nou-născutului la viața extrauterină.

Un rol posibil a fost descris în proliferarea celulară, întrucât bradikinină activează ADN și crește rata mitozelor în limfocitele timice. La nivelul țesutului nervos, plasmakininele activează receptorii nociceptivi periferici, participând la creșterea sensibilității algogice. Rolul lor de modulatori sinaptici este încă discutabil.

Adrenomedulina (ADM). Este un peptid vasoactiv descoperit inițial în feocromocitomul uman (Kitamura și colab., 1993), similar din punct de vedere structural cu *CGRP* (*Calcitonin Gene Related-Peptide*). Ulterior, ADM a fost identificată în numeroase alte țesuturi și organe, stabilindu-i-se structura chimică și proprietățile biologice. S-a precizat, printre altele, că ADM este un polipeptid constituit din 52 de aminoacizi cu expresie genică localizată pe cromozomul 11 la om.

Pe plan funcțional s-a stabilit că ADM posedă acțiuni vasodilatatoare mediate de stimularea sintezei de oxid nitric, inhibarea eliberării de catecolamine, endotelioe și aldosteron. Efectele miorelaxante vasculare sunt mai evidente la nivelul vaselor mici decât al celor mari și se produc prin intermediul unui receptor transmembranar specific cuplat cu o proteină G membranară și cu sistemul adenilat ciclază-AMP ciclic.

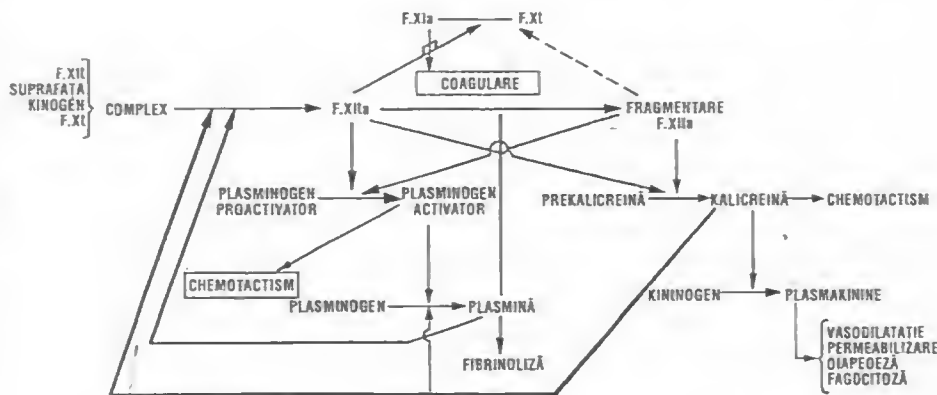


Fig.14.7. Interferențele sistemului kaliceină-plasmakinine cu factorii coagulării și fibrinolizei.

Efecte inhibitorii exercită ADM și asupra sistemului vasoconstrictor renină-angiotensină atât în cazul arterelor de conductanță, cât și al celor de rezistență (Haulică și colab., 2004).

La nivel central, ADM predomină în nucleii supraoptici și paraventricular al hipotalamusului, cu rol inhibitor asupra secreției de ADH și ACTH.

Concentrația plasmatică a ADM apare crescută la pacienții cu insuficiență cardiacă congestivă, infarct miocardic, hipertensiune arterială și insuficiență renală, ca fenomen compensator de contracarare a dereglărilor hemodinamice locale și generale induse de aceste stări patologice.

14.2.3. HORMONII GASTRO-INTESTINALI

În peretele tubului digestiv, începând de la esofag și până la colon, inclusiv în pancreas, au fost identificate până în prezent 35 de peptide cu activitate biologică având rol de hormoni sau candidați de hormoni digestivi, din care amintim: gastrina, colecistokina, peptidul gastric inhibitor (GIP), enteroglucagonul, insulina, motilulul, neurotensina, polipeptidul pancreatic, secretina, substanța P, peptidul vasoactiv intestinal (VIP).

Cel puțin o parte din aceste peptide au fost găsite, de asemenea, în corpul celular și prelungirile din neuronii unor zone ale sistemului nervos central, fiind, se pare, implicate atât în comportamentul alimentar, cât și în funcționalitatea tractului digestiv.

Peptidele sistemului endocrin difuz pot acționa atât ca mediatori chimici, cât și ca hormoni circulanți. În cootivare este prezentată fiziologia principalilor hormoni gastro-intestinali, cu excepția gastrinei, care a fost deja descrisă la reglarea umorală a secreției gastrice.

Colecistokinină-pancreozimina (CCK-PZ). În 1964, Jarpes, Mutt și Toczko izolează din mucoasa duodeno-jejunală un peptid cu rol bivalent, având acțiune stimulatorie atât asupra motilității biliare, cât și asupra secreției pancreatice. Lanțul structural polipeptidic al CCK-PZ se găsește sub două forme moleculare – una cu 33 de aminoacizi, iar alta cu 39 de aminoacizi. Segmentul terminal al CCK-PZ, și anume carboxil-pentapeptidamid, este identic cu al gastrinei, reflectând probabil o origine ontogenetică comună.

În afara de mucoasa duodeno-jejunală, CCK-PZ se mai găsește în plexurile mieenterice Auerbach, submucoasele Meissner și creier (aici, în cantități chiar mai mari decât în intestin).

În ceea ce privește acțiunile sale biologice, CCK-PZ este un puternic stimulator al enzimelor pancreatice (secreție ecobolică) și slab stimulator al secreției pancreatice de apă și bicarbonați (secreție hidrolitică).

Receptorii se găsesc direct pe membrana acinilor pancreatice. Hormonul exercită în același timp efecte trofice asupra pancreasului și de creștere a conținutului acestuia în ADN, ARN și proteine.

CCK-PZ este un puternic stimulator al contracției veziculei biliare și relaxării sfincterului Oddi. Efectul se pare că are loc direct asupra musculaturii, nefiind antagonizat de atropină sau alți blocați.

Polipeptidul CCK-PZ determină relaxarea sfincterului esofagian inferior și antagonizează *in vitro* acțiunea motorie a gastrinei. El este, de asemenea, un inhibitor al evacuării gastrice, efect ce se obține la doze mai mici decât cele necesare stimulării secreției pancreatice.

Peptidele de tip CCK-PZ determină inhibarea secreției acide gastrice și au fost considerate ca făcând parte din hormonii intestinali de tip „enterogastron”.

Un alt efect principal îl constituie stimularea motilității intestinale, cu creșterea frecvenței peristalticelor de acțiune în colon și favorizarea tranzitului, efecte oalterate de atropină.

Deoarece CCK-PZ a fost găsită în creier și LCR, iar trecerea hormonului periferic se face greu prin bariera hemato-encefalică, se consideră că acest hormon joacă un rol esențial în reglarea apetitului.

Eliberarea CCK-PZ în sânge în timpul digestiei ar reprezenta, după Gibbs (1978), semnalul cel mai important de sațietate.

În același timp, administrarea intracerebro-ventriculară de CCK-PZ inhibă ingestia de alimente, iar la șoarecii obezi s-a constatat un conținut în CCK și în SNC mai mic decât la normali.

S-a constatat, de asemenea, că hormonul stimulează creșterea eliberării de insulină, somatostatina pancreatică, GIP, polipeptid pancreatic și calcitonină.

CCK-PZ este eliberată la nivelul tractului gastro-intestinal prin stimularea mobilizării calciului, urmată de creșterea cAMP celular și activarea secreției de enzime.

Secretina. Este prima substanță biologic activă identificată ca hormon, Bayliss și Starling demonstrând încă din 1902 stimularea secreției pancreasului exocrin, denervat, la injectarea intraduodenală de HCl. În 1961, Jarpes și Mutt purifică secretina, iar, în 1966, Bodanski sintetizează pentru prima dată hormonul, produs apoi pe scară industrială de Wünsch, în 1972.

Secretina este un polipeptid bazic, format din 27 de aminoacizi, din care 14 aminoacizi comuni în secvență structurală cu ai glucagonului. Hormonul este eliberat în circulația generală de către celulele S din mucoasa duodeno-jejunală.

Cel mai puternic factor stimulator al eliberării de secretină îl constituie concentrația ionilor de H^+ , acidifierea intraduodenală determinând creșterea concentrației sanguine a secretinei. La un pH superior lui 4,5, secreția pancreatică de bicarbonați încetează în urma suprimării eliberării secretinei.

Secretina stimulează în principal o abundentă secreție hidrobicarbonată a pancreasului exocrin (secreția hidrolitică), acțiune mediată de sistemul adenilat ciclază-cAMP, mecanism calciu-independent. În timp ce secretina stimulează secreția pancreatică de bicarbonat, acesta, la rândul lui, inhibă eliberarea secretinei prin neutralizarea hidrogen-ionilor sosiți în duoden și jejun din stomac, realizându-se în felul acesta o reglare de tip *feed-back* negativ.

Cantitatea de suc pancreatic și conținutul în enzime crește dacă la secretină se asociază CCK sau VIP.

Administrarea cronică de secretină determină o ușoară creștere în greutate a pancreasului, asociată cu scăderea sensibilității la secretină, fără ca răspunsul maxim în bicarbonat să fie diminuat.

Secretina are efecte și asupra altor teritorii digestive. Astfel, ea inhibă atât secreția acidă stimulată de gastrină, cât și eliberarea acesteia indusă de ingestia de alimente, crescând în schimb secreția de pepsină.

Secretina stimulează eliberarea de insulină glucozo-dependentă. Are acțiune și asupra funcției biliare, stimulând absorbția apei din sucul biliar la nivelul ductelor intrahepatice, la care se asociază creșterea concentrației în clor și descreșterea concentrației în săruri biliare. Secretina potențează efectele contractile ale CCK-PZ asupra veziculei biliare și, la rândul ei, prezența bilei în duoden stimulează eliberarea secretinei.

Inhibă motilitatea intestinului și antagonizează stimularea produsă de CCK-PZ.

Alte efecte semnalate au fost scăderea presiunii sfincterului esofagian inferior și acțiunea diuretică.

Polipeptidul vasoactiv intestinal (VIP). În 1970, Said și Mutt izolează din mucoasa intestinului subțire un peptid format din 28 de aminoacizi, răspândit în întreg tubul digestiv, de la esofag la colon, ce s-a dovedit a fi un puternic agent vasodilatator și hipotensiv.

Secvența aminoacizilor din structura VIP a fost determinată de aceiași autori în 1974, an în care este realizată și sinteza de către Bodanski.

Acțiunile vasodilatatoare ale VIP sunt predominante pe teritoriile mezenteric și pulmonar.

Prezintă o acțiune inotrop pozitivă pe mișchiul cardiac, crește debitul cardiac, relaxează mușchiul traheal și pe cel bronșic și crește minut-volumul respirator.

VIP prezintă acțiuni metabolice manifestate prin lipoliză și glicogenoliză, asociate cu stimularea cAMP, eliberarea de insulină și glucagon.

Administrat la om, scade absorbția de apă, sodiu și clor din jejun și crește secreția pancreatică bicarbonată. Are capacitatea de a stimula adenilat ciclaza și acumularea de cAMP în celulele intestinale epiteliale, efect inhibat de somatostatina și atropină.

Totodată, asemănător secretinei, VIP inhibă secreția gastrică stimulată de gastrină sau alimente, dar crește în schimb secreția bazală de pepsină. În general răspunsul maxim inhibitor la VIP reprezintă numai 15–20% din răspunsul maximal al secretinei. Aceasta s-ar explica prin afinitatea mai mică a VIP pe receptorii acinarii pancreatice, reflectată în gradul mai mic de stimulare a cAMP celular.

Efectul obișnuit al VIP pe musculatura gastro-intestinală este relaxarea. Diminuează forța de contracție a mușchiului neted antral, a sfincterului inferior esofagian și relaxează partea superioară a stomacului.

La nivelul intestinului, VIP stimulează contracția fibrelor longitudinale și inhibă contracția fibrelor circulare. În producerea efectelor pe tractul digestiv, un rol important se pare că îl joacă neuronii și fibrele VIPergice.

Alte efecte ale VIP constau în: controlul fluxului sanguin cerebral, reglarea funcțiilor hipotalamo-hipofizare și eliberarea hormonilor hipofizari (prolactină, somatotrop, LH).

Cantități importante de VIP au fost găsite în celulele endocrine intestinale, creier și terminațiile periferice nervoase.

În peretele intestinal, VIP este prezent îndeosebi în fibrele nervoase și neuronii din plexurile intrinseci ale stratului muscular, în concentrații mai înalte decât cele din mucoasă și submucoasă.

Simpatetomia și vagotomia nu afectează conținutul intestinal în VIP.

În sistemul nervos central, concentrații crescute de VIP se găsesc în neocortex, nucleii limbici subcorticali, nucleii hipotalamici și neurohipofiză.

Stimularea nervului vag favorizează eliberarea de VIP de origine intestinală în sângele portal și circulația limfatică, eliberare care nu este inhibată de atropină sau de agenți beta-blocanți, ci numai de hexametoniu.

De asemenea, instilările duodenale de HCl, grăsimi și alcool provoacă creșteri ale polipeptidului în serul sanguin. Localizarea VIP în fibrele nervoase centrale și periferice, ca și prezența adenilat ciclazei în sinaptozomii acestora pledează pentru calitatea de neurotransmițător a acestuia.

Funcția mediatoră a VIP din anumite terminații nervoase ar aparține unei categorii de fibre diferite de cele colinergice și adrenergice, și anume inervației vegetative purnergice (Burnstock, 1972) sau peptidergice (Bishop, 1977).

Peptidul gastric inhibitor (GIP). Aparține polipeptidelor glucagonice și a fost izolat și purificat de către Brown și Dryburgh în 1971. GIP este format din 43 de aminoacizi, iar, din aceștia, 15 din primii 26 de aminoacizi au poziții identice cu cei din structura glucagonului, iar 9 sunt comuni lanțului polipeptidic al secretinei.

Eliberarea GIP are loc în celulele secretoare de tip K, predominant din mucoasa duodenală și mai puțin în cea jejunală. Procesul de eliberare are loc în două faze, în funcție de acțiunea decalată în timp a glucozei și grăsimilor, care constituie cei mai puternici factori stimulatori.

Acțiunile biologice principale ale hormonului GIP sunt reprezentate de inhibarea secreției și motilității gastrice, stimularea secreției intestinale și stimularea secreției de insulină și glucagon.

Acțiunea glucagonotropă a GIP este antagonizată de nivelul crescut al glicemiei. Efectele insulinotrope ale GIP, considerate drept cele mai importante la om, îi conferă acestui hormon și denumirea de polipeptid insulinotrop glucozo-dependent. Această acțiune depinde de concentrația glucozei în sânge. Astfel, când glicemia este sub 1 g/l, GIP nu stimulează eliberarea insulinei. Se apreciază în prezență că secvența amino-terminală este necesară pentru acțiunea insulinotropă, în timp ce secvența carbonului terminal este necesară pentru acțiunea de inhibare a secreției gastrice acide.

Ingerarea alimentelor stimulează eliberarea de GIP, îndeosebi glucoza și grăsimile emulsionate, dar și unii aminoacizi, ca arginina, histidina, izoleucina, leucina, lizina și treonina, administrați sub formă de mixtură.

Eliberarea GIP de către glucoză este crescută la indivizii cu vagotomie și piloroplastie, în antecedente, asociată cu o creștere a glicemiei, ce poate fi explicată prin stimularea evacuării gastrice, indicând că nervul vag nu este un mediator important al secreției de GIP.

Diminuarea secreției gastrice de către GIP este exercitată prin eliberarea unei substanțe inhibitoare, somatostatina. Secrețiile exocrine și biliare nu sunt influențate de GIP.

Datorită acțiunilor fiziologice foarte asemănătoare cu cele ale enterogastrinei, unii cercetători l-au identificat cu aceasta, aspectul nefiind încă elucidat.

Enteroglucagonul. Faptul că pancreatectomia nu duce la dispariția din plasmă a glucagonului a sugerat existența unei surse extrapancreatice a acestuia, ceea ce a dus la identificarea unei substanțe *glucagon-like* în mucoasa tractului gastro-duodenal.

Sundby izolează în 1976, din extracte jejunale de porc, un peptid înalt purificat, cu activitate glucagonică puternică, format din 100 de aminoacizi, pe care l-a numit glicentin. De fapt, acesta s-a dovedit a fi un precursor al glucagonului, atât pancreatic, cât și intestinal, ce mai conține în structura sa și fragmente ale altor peptide intestinale.

Enteroglucagonul este răspândit la nivelul duodenului, jejunalei și în regiunea fundică a stomacului.

Acțiunile sale fiziologice sunt reprezentate de stimularea glicogenolizei, gluconeogenezei și cetogenezei.

Efectele enteroglucagonului sunt dominate, ca și în cazul glucagonului de origine pancreatică, de acțiunea sa glicogenolitică, în principal prin mobilizarea hidrocarbonatelor din depozite. Celelalte acțiuni sunt mai slabe decât ale hormonului pancreatic.

Alte acțiuni care au fost puse în evidență la nivelul tractului gastro-intestinal sunt inhibarea motilității intestinale și absorbției intestinale a apei și electroliților, a secreției enzimatice pancreatice și de bicarbonat, a secreției gastrice acide și stimularea fluxului biliar.

Glucosa și trigliceridele stimulează sinteza lui la nivelul primei porțiuni a intestinului subțire și în stomac, spre deosebire de secretină, care o inhibă. Astfel, cu toate că glucosa inhibă eliberarea glucagonului pancreatic, administrarea orală sau intestinală de glucosă duce la creșterea în totalitate a peptidelor glucagon-like din plasmă și există dovezi că acest răspuns se datorează în mare măsură enteroglucagonului.

Experimente pe câine au arătat, de asemenea, că administrarea intraduodenală a grăsimilor duce atât la eliberarea glucagonului de tip pancreatic, cât și a enteroglucagonului, în timp ce introducerea de grăsimi în ileon determină eliberarea numai a enteroglucagonului. Ingestia unei alimentații mixte la indivizii normali duce la o creștere mică a enteroglucagonului plasmatic, dar la pacienții cu alterarea absorbției în segmentul superior al intestinului subțire se constată un răspuns exagerat.

Funcțiile enteroglucagonului nu sunt, încă, complet descifrate: totuși, localizarea celulelor L, producătoare de acest hormon în ileonul distal și creșterea glucagonului intestinal în cazul prezenței unei cantități crescute de alimente nedigerate în contact cu aceste celule sugerează aprecierea că enteroglucagonul este unul din factorii de *feed-back* ce controlează funcția segmentelor digestive superioare.

Somatostatina. Extras la început din hipotalamusul de oaie și de porc, a fost izolat în 1976 de către Schally și pus apoi în evidență și la nivelul regiunii fundice și al celei antrale a stomacului, în duoden, în glandele salivare și pancreas, în tiroidă etc.

Polipeptidului i s-au descris două fracții, una formată din 28 de aminoacizi (SS_{28}), numit și somatostatin intestinal, și alta de 14 aminoacizi, denumit somatostatin hipotalamic.

Principiul activ are secvența de aminoacizi 10-13 comună cu secretina și glucagonul și era cunoscut mai demult ca factor de inhibare a hormonului de creștere adenohipofizari.

Celula de origine gastro-intestinală a somatostatinei ar fi celula D, răspândită practic la nivelul întregii mucoase, începând cu regiunea fundică a stomacului și terminând cu colonul, dar aglomerări importante există la nivelul stomacului și duodenului.

Celula D reprezintă unul din cele 4 tipuri de celule ale insulelor Langerhans pancreatice, celelalte fiind celulele: alfa, beta și PP. Fiecare din cantitățile de somatostatin găsite la nivelul stomacului și pancreasului depășește pe cele din hipotalamus.

Deprimând nivelul plasmatic al aproape tuturor hormonilor digestivi (gastrina, secretina, CCK-PZ, VIP, GLP, motilinul), ca și a neurotransmiților adrenergici și colinergici la musculatura netedă, efectele somatostatinei apar justificate de acest mod de acțiune.

Fibre nervoase conținătoare de somatostatin se găsesc în plexul mienteric Auerbach, în plexul submucos și la baza criptelor Lieberkühn.

Formarea polipeptidului la nivel gastric este dependentă de HCl printr-un mecanism de *feed-back*. Astfel, eliberarea de somatostatin din regiunea fundică a stomacului este favorizată de acidifierea bulbului duodenal și de stimularea secreției gastrice. La rândul lui, somatostatina are un rol inhibitor asupra eliberării de gastrină în circulație și HCl în suc gastric.

Hormonul poate acționa și direct asupra mucoasei gastrice, inhibând secreția clorhidropeptică. Infuzia intravenoasă de somatostatin descrește, de asemenea, rata diviziunii celulare a mucoasei gastrice și sinteza de ADN, iar efectele trofice ale gastrinei sunt blocate.

Administrarea intragastrică de glucosă, proteine și lipide determină creșterea eliberării de somatostatin.

O altă acțiune asupra stomacului este aceea de inhibare a evacuării gastrice prin suprimarea eliberării de motilin.

Cantități importante de somatostatin sunt secretate de pancreas ca reacție de răspuns la acțiunea substanțelor ce stimulează eliberarea de insulină, de tipul glucozei, glucagonului, aminoacizilor, colecistokininei. Somatostatina eliberată are, la rândul lui, acțiune inhibitoare asupra secreției de insulină și glucagon și, de asemenea, asupra pancreasului exocrin, diminuând fracția de apă și enzime a sucului pancreatic, dar nu și pe cea de bicarbonat.

Mecanismul acțiunii asupra celulelor exocrine pancreatice are loc prin blocarea fixării calciului.

Asupra tractului gastro-intestinal somatostatina mai prezintă în plus următoarele efecte: inhibă contracția veziculei biliare și relaxează jonctiunea coledoco-duodenală; deprimă tonusul sfincterului esofagian inferior prin suprimarea verigii umorale mediatore și inhibă absorbția aminoacizilor.

În general, efectele inhibitoare extrahipofizare par a fi produse ca urmare a blocării receptorilor beta-adrenergici cu deprimarea cAMP și a fixării calciului.

Somatostatina are și efecte nedigestive, prin inhibarea descărcării de hormoni adenohipofizari (STH, FSH, TSH).

Modificări ale poziției primilor doi aminoacizi din conformația sa moleculară (Ala-Gly) determină scăderea acțiunilor fiziologice ale somatostatinei cu 45%, în timp ce mutații ale unui singur aminoacid din următorii 12 membri ai lanțului duc la pierderea a 95% din activitatea polipeptidului.

Somatostatina este mult folosit în tratamentul diabetului zaharat, al acromegaliei, în pancreatita cronică și ulcerul gastro-duodenal.

Motilinul. A fost izolat de Brown (1971) dintr-un extras de mucoasă duodenală, obținut în timpul purificării secretinei, și a fost caracterizat prin capacitatea de a stimula activitatea motorie gastrică și secreția de pepsină, dar nu și secreția acidă. Secvența completă a aminoacizilor din polipeptid a fost stabilită de același autor un an mai târziu.

Este un peptid liniar, ce conține 22 de aminoacizi. Alcalinizarea regiunii duodeno-jejunale determină o creștere a concentrației motilinului plasmatic ce coincide cu amplificarea activității motorii a stomacului.

Motilinul produce, de asemenea, contracții puternice ale sfincterului esofagian inferior și ale stomacului la animalul flămând. Stimularea musculaturii netede gastro-intestinale a fost inhibată parțial de atropină și total de asocierea acesteia cu hexametoniu sau tetradotoxină, sugerând că motilinul acționează prin stimularea neuronilor colinergici preganglionari. VIP inhibă efectul contractil al motilinului, indicând posibilitatea unui control umoral local asupra acestuia.

In vitro, răspunsul contracției al duodenului la motilin este suprimat de atropină, ouabaină (blocant al pompei Na^+-K^+) și verapamil (blocant al canalelor de Ca^{2+}).

La om, motilinul crește rata evacuării de alimente solide și o încetinește pe cea a alimentelor lichide asociat cu creșterea eliberării de pepsină. Asupra secreției pancreatice și salivare datele din literatură sunt, încă, contradictorii.

În privința capacității de stimulare a motilității gastrice, motilinul natural este de 50 de ori mai puternic decât acetilcolina.

Intestinul gros prezintă o sensibilitate mai scăzută la acțiunea hormonului, efectele fiind semnificative numai la doze farmacologice.

În ceea ce privește distribuția, celulele cu motilin (de tip enterocromafin) sunt aglomerate la nivelul mucoasei duodenului și segmentelor superioare ale jejunului, ale mucoasei gastrice, în submucoasa și stratul muscular al esofagului, stomacului și jejunu-ileonului, colonului și veziculei biliare.

Neuronii cu motilin au fost descoperiți și în sistemul nervos central la nivelul hipofizei, hipotalamusului, cerebelului, cortexului și epifizei.

Pe baza studierii variațiilor ciclice ale motilinului plasmatic și ale corespondenței cu activitatea contractilă gastro-intestinală, s-a apreciat că acest hormon reglează activitatea motorie intestinală și gastrică în faza interdigestivă.

Bombezina. Face parte dintr-un complex de peptide similare ca structură și acțiuni, extrase din pielea diferitelor specii de amfibieni (alutensina, ranatensina, litorina), având ca acțiune principală stimularea gastrinei cu răspuns hipersecretor acid secundar (Erspamer, 1980).

Recent, în mucoasa gastrică și intestinală a mamiferelor a fost izolat un peptid gastrineliberator, ce conține 27 de aminoacizi, dintre care primii 9 sunt identici cu ai bombezinei (McDonald, 1979).

Bombezina are la om o puternică acțiune stimulatorie asupra secreției gastrice și secreției de enzime pancreatice; de asemenea, contractă vezicula biliară și diminuează motilitatea gastrică și duodeno-jejunală; determină antidiurează și hipertensiune arterială sistemică prin stimularea sistemului renină-angiotensină; activează eliberarea de insulină, peptid pancreatic și glucagon; este factor de creștere specific pentru neoplasmul bronho-pulmonar.

Acțiunea de stimulare a eliberării de gastrină nu este afectată de atropină, în schimb antrectomia sau acidifierea regiunii antrale inhibă parțial acest efect.

La administrarea dozelor mici de bombesină se observă o creștere proporțională a secreției gastrice acide, dozele mari reduc însă aciditatea gastrică.

Administrarea intravenoasă la om a bombesinei determină scăderea eliberării de hormoni anterobipofizari.

Pe cale intracisternală la șobolan are acțiune hipotermică (de 10 000 de ori mai puternică decât alte peptide de tip *bombesin-like*), stimulează eliberarea de prolactină, produce hiperglicemie asociată cu creșterea glucagonului și descreșterea insulinei plasmatică.

Deși la unele specii de animale bombesina produce hipertensiune arterială, la om efectele asupra presiunii arteriale sunt minime.

Omul prezintă o sensibilitate deosebită la bombesină în ceea ce privește efectul de stimulare a eliberării de gastrină și creștere a secreției gastrice. Cu toate că la individul uman a fost depistată activitate imunoreactivă *bombesin-like* în tractul gastro-intestinal, sunt necesare încă dovezi privind corelația dintre bombesină și gastrină.

Urogastrona. Este un polipeptid format din 53 de aminoacizi și a fost izolat din urina umană. Structura sa este asemănătoare cu factorul de creștere epidermic (EGF) izolat din glandele submaxilare ale șoarecelui mascul. Și la om a fost identificat un astfel de factor de creștere epidermic și care este parțial similar urogastrinei, dar fără a fi identic.

Molecule mari de substanțe *urogastron-like* au fost găsite în plasma umană, salivă, suc gastric și lapte, care pot trece în urogastrona cu activitate biologică crescută în prezența acțiunii hidrolitice a tripsinei sau arginini esterazei.

Acțiunea biologică a urogastrinei constă în inhibarea secreției gastrice acide. Această funcție a fost găsită la unele mamifere în timpul stimulării cu histamină, pentagastrină sau insulină și la subiecții umani cu gastrinoame.

Celulele eliberatoare de urogastronă au fost identificate și la om în glandele Brünner duodenale și în glandele submaxilare. Ingestia de alimente nu modifică rata eliberării de urogastronă, de asemenea hormonul nu pare a avea efecte asupra secrețiilor pancreatice, biliare și salivare.

Urogastrona umană prezintă unele acțiuni similare cu cele ale EGF; astfel, polipeptidul previne apariția ulcerului duodenal sau îi scurtează durata de vindecare la șobolan și cobai (Gregory, 1978). Aceste efecte nu par a fi date numai de simpla reducere a activității secreției gastrice sub acțiunea urogastrinei, ci și de creșterea activității omitei decarboxilazei, enzimă importantă în biosinteza poliaminelor participante la creșterea tisulară.

Aceste efecte sugerează că urogastrona poate contribui la reglarea endogenă a creșterii celulelor epiteliale.

Polipeptidul pancreatic. Polipeptidul pancreatic (PP) a fost izolat inițial din pancreasul de păsări în cursul cercetărilor asupra insulinei aviare (Kimmel, 1975) și apoi din extractele pancreatice ale unor mamifere (Chance și Floyd, 1977).

Structura chimică a peptidului este formată din 36 de aminoacizi cu secvențe parțial diferite în funcție de specie. Segmentul activ este reprezentat de prezeoța grupării carboxilice a tirozinamidei în lanțul terminal, care este răspunzătoare de proprietățile biologice.

În ceea ce privește răspândirea, pancreasul pare a fi locul major de producere și depozitare, dovadă că după pancreatectomie nivelul plasmatic al hormonului devine nedozabil.

Nivelul bazal al polipeptidului depinde liniar de vârstă, crescând cu fiecare decadă, datorită hiperplaziei celulelor producătoare.

Eliberarea este rapidă și puternică după ingestia de proteine și persistă aproximativ 8 ore. Ingestia de glucide și grăsimi are un efect mai slab. Se pare că tractul digestiv are un rol important asupra ratei de eliberare, întrucât perfuziile de aminoacizi, glucoză sau lipide nu determină decât creșteri minore ale hormonului.

O serie de hormoni gastro-intestinali stimulează eliberarea PP, de exemplu: VIP, GIP, secretina și bombesina.

Descărcarea inițială de PP la ingestia de alimente este mediată vagal, în timp ce hormonii gastro-intestinali sus-menționați prelungesc în timp eliberarea acestuia.

Stimularea beta-receptorilor adrenergici activează descărcările de PP, în timp ce alfa-receptorii adrenergici au efecte inhibitoare.

Referitor la acțiunile biologice, cercetările au demonstrat că PP produce scăderea secreției bazale și stimularea de suc pancreatic și a ratei de enzime și bicarbonat, precum și reducerea conținutului în bilirubină al sucului duodenal și creșterea motilității intestinale.

În acest mod, PP intervine ca un factor modulator în autoreglarea secreției pancreatico-biliare în condițiile ingestiei de alimente, moderând debitul și cantitatea de suc pancreatic și bilă ajunsă în intestin.

Alte substanțe biologice prezente în tractul gastro-intestinal. La nivelul tubului digestiv au mai fost găsite și alte substanțe biologice active (peptide) ce intervin în reglarea activității de nutriție a organismului, dar a căror structură sau rol nu sunt încă suficient de bine precizate.

Astfel, *ACTH* se găsește prezent, în afară de ariile cunoscut (adenohipofiză, hipotalamus, sistem limbic, trunchi cerebral și bulb), și în celulele endocrine din pancreas, stomac și duoden. La nivelul intestinului, el are efecte *opioid-like* antagonizate de naloxon.

Enkefalinele au fost identificate și ele în stomac și duoden, în celulele endocrine și neuronii din peretele intestinal, unde acționează ca inhibitori ai motilității și secreției intestinale și ai secreției pancreatice.

La nivelul tractului digestiv, *substanța P* este implicată în reglarea locală a funcției acestuia. Ea stimulează fluxul salivar și exercită efecte contracturante directe la nivelul musculaturii netede intestinale.

Neurotensina, localizată în celulele de tip N din mucoasa celulelor ileale (85% din totalul neurotensinei în organism), inhibă secreția acidă stimulată de peptagastrină, precum și activitatea motorie gastro-intestinală.

Alte substanțe biologice implicate mai sunt: *chimosinul*, izolat din mucoasa duodenală, cu rol stimulator asupra secreției de chimotripsinogen pancreatic, *enteroxintinul*, eliberat de mucoasa jejunală, cu acțiune stimulatorie asupra celulelor oxintice gastrice, și *bulbogastrona*, pusă în evidență în mucoasa primei porțiuni a duodenului, cu rol în inhibarea secreției gastrice.

Recent grelina sintetizată de mucoasa gastrică stimulează apetitul prin mecanism hipotalamic.

14.2.4. OPIOIDELE ENDOGENE

Termenul de opiat desemnează substanțe derivate din opium, un produs natural complex care conține 20 de alcaloizi distincți, iar cel de narcotic, utilizat în sens tradițional, se referă la analgezice cu proprietăți *morfîn-like* și care produc dependență fizică. Apariția drogurilor de sinteză și semisinteză cu caracteristici *morfîn-like* a condus la apariția termenului de OPIOID, care se referă la toate substanțele exogene naturale sau sintetice ce leagă specific mai multe populații de receptori opioizi, producând efecte agoniste.

Existența de receptori farmacologici care să recunoască drogurile morfînice a fost bănuită din 1970, iar identificarea lor s-a realizat în 1973, independent, de către grupurile Snyder-Simon și Terenius. Prezența acestor receptori în creier și alte țesuturi, capabili de a lega specific liganzi exogeni din grupul morfînelor, a dus la ipoteza existenței de substanțe endogene care să fie recunoscute specific de receptori menționați mai sus. Mai multe laboratoare au intrat imediat în competiție, finalizată cu identificarea în creierul mamiferelor a două peptide morfînometice, *Leu-enkefalina* și *Met-enkefalina*, de către Hughes și Kosterlitz (1975) și, ulterior, a unui alt grup de peptide, de asemenea morfînometice, dar cu lanț aminoacidic mai lung, numite eodorfine de către Guillemin (1976).

Biosinteza opioidelor endogene are loc pornind de la trei precursori polipeptidici identificați după studii realizate pe ADN recombinant și ARN mesager corespunzător ajuns la nivel ribozomal (Nakanishi, 1979), și anume (vezi fig. 13.7 de la Hormoni adenohipofizari):

- a) proenkefalina (în medulosuprarenală);
- b) proopiomelanocortin (POMC) (în hipofiză);
- c) prodiorfina (în hipotalamus și hipofiză).

Filiația peptidelor opioide parcurge mai multe etape. Astfel, cel mai cunoscut precursor, POMC (239 de aminoacizi), poate fi scindat enzimatic atât la capătul carboxil terminal, cât și la cel NH_2 -terminal, rezultând două fragmente. Primul fragment apare în urma acțiunii unei enzime *trypsin-like* și este reprezentat

de un lanț polipeptidic carboxil terminal cu 91 de aminoacizi și greutate moleculară de 10 000 de daltoni, cunoscut sub numele de beta-lipotropină (beta-LPH).

Cel de al doilea fragment (NH_2 -terminal), cu greutate moleculară de 30 000 de daltoni, reprezintă ACTH, care, la rândul lui, conține secvențe ale hormonului alfa-melanocitostimulator (alfa-MSH).

Cele două fragmente sunt unite printr-o pereche de acizi aminați bazici (Lys-Arg), loc care corespunde și punctului de clivare a moleculei-mamă. S-au pus în evidență și alte puncte de rupere (Lys-Arg, Lys-Lys, Arg-Arg), repartizate pe toată lungimea lanțului polipeptidic, putând duce la apariția mai multor neurohormoni.

Astfel, din beta-LPH prin clivare rezultă patru endorfine diferite și Met-enkefalina:

- alfa-endorfină – 16 aminoacizi (LPH^{61-76})
- beta-endorfină – 31 aminoacizi (LPH^{51-91})
- delta-endorfină – 17 aminoacizi (LPH^{61-87})
- gamma-endorfină – 27 aminoacizi (LPH^{61-87})
- Met-enkefalina – 5 aminoacizi (LPH^{61-65}).

Cele trei sisteme opioide: enkefalinic, endorfinic și dinorfinic nu sunt complet separate. Toți precursorii pot genera, așa după cum se observă, peptide diferite, dar și identice, cu lungimi modificate ale lanțului polipeptidic în funcție de locul de scindare, iar aceasta depinde, la rândul ei, de structura nervoasă în care se produc opioide, de prezența anumitor enzime specifice și de procesul funcțional în care sunt implicate.

În organism pot fi prezenți, în afară de opioidele endogene, și opioide de origine exogenă; astfel, pe lângă binecunoscuta morfină, pot ajunge derivați peptidici de digestie ai glutenului și hidroxilatului de cazeină, frecvent întâlniți în alimentație. Cazeina, sub acțiunea unor enzime proteolitice digestive, poate elibera doi derivați cazeo-morfinci cu activitate opiată redusă (beta-cazomorfinele 5 și 7).

Distribuția peptidelor opioide endogene și a precursorilor lor în sistemul nervos, efectuată prin studii imunohistochimice, a arătat că neuronii enkefalinergici sunt răspândiți pe teritorii mai întinse decât cei endorfinergici.

Neuronii enkefalinergici sunt frecvent interneuroni prezenți în densitate mare la nivelul nucleilor striati, diencefalului, trunchiului cerebral și măduvei. Au fost puse în evidență două căi enkefalinergice lungi, una strio-palidă, iar alta ce face legătura între nucleul central al amigdalei și stria terminală.

Compleții privind distribuția sistemului enkefalinic au fost aduse de identificarea Met- și Leu-enkefalinei în LCR, substanța gri pericisternală, nucleii: accumbens, caudat, putamen, amigdală, paraventricular, supraoptic, în regiunea perifornică, hipotalamusul lateral, formațiunea reticulată, nucleii cohleari și vestibulari, straturile 1-2 din substanța gelatinoasă medulară, medulosuprarenală. Având în vedere această răspândire largă, sistemul enkefalinergic a fost apreciat ca făcând parte din sistemul neuro-endocrin difuz (SNED, APUD).

Sistemul endorfinergic este distribuit pe teritorii mai restrânse, fiind limitat la un grup de neuroni endorfinergici hipotalamici din zona tuberală cu proiecții ascendente în septumul ventral, nucleii accumbens și paraventricular, cu proiecții descendente în trunchiul cerebral, substanța gri periaeductală, locus coeruleus și formațiunea reticulată. Un alt pool de celule endorfinergice se află în lobii anterior și intermediar ai hipofizei.

Determinările biochimice au relevat prezența endorfinelor și în substanța gri periaeductală, talamus, nucleul caudat, măduva spinării, amigdală, sistemul limbic, nucleii trunchiului cerebral.

Fixarea opioidelor pe membranele sinaptice a permis caracterizarea tipurilor de receptori opioizi specifici. Localizarea acestora s-a realizat prin tehnici de autoradiografie cu liganzi marcați, punându-se astfel în evidență cinci categorii de receptori opioizi, și anume: Miu, Kappa, Delta, Sigma și Epsilon.

1. **Receptorii Miu** (cu subtipurile Miu-1 și Miu-2) prezintă afinitate pentru compuși morfinci clasici (morfină, codeină etc), beta-endorfină și enkefaline. Activarea receptorilor Miu-1 este principala responsabilă de analgezia cu origine supraspinală, în timp ce stimularea receptorilor Miu-2 are ca efect deprimarea ventilației, bradicardie și euforie. Antagoniștii Miu sunt naloxonul, pentozocina și nalbufina, primul prezentând cea mai înaltă selectivitate.

Receptorii Miu sunt prezenți atât la nivelul sistemului nervos central (trunchiul cerebral), cât și în țesuturi periferice.

2. **Receptorii Kappa** (ketazolinici) au afinitate în special de natură farmacologică pentru agoniștii de tip benzomorfinic (substanțe de sinteză narcotic-analgezice și nepeptidice, cum sunt ketazocina, bremazocina, nalorfină), dar și pentru derivați de prodinorfină (Leu-enkefalina, dinorfină). Efectele date de activarea acestor receptori sunt: analgezia, sedarea, somnul, catalepsia, ataxia, depresarea ventilației, mioza și defecația.

La rândul lor, receptori Kappa sunt sensibili la naloxon, ce se comportă ca antagonist. Distribuția acestor receptori are localizare primară în cortexul cerebral.

3. **Receptorii Delta** interacționează preferențial cu enkefalinele, în special cu Leu-enkefalina, mai puțin cu Met-enkefalina. Rolul lor principal este de modulare a receptorilor Miu, dar s-a descris o afinitate și pentru beta-endorfină, egală cu cea manifestată de receptorii Miu.

4. **Receptorii Sigma** au afinitate enkefalin-specifică și mai redusă pentru alcaolizi morfinci și endorfine. Activați, sunt responsabili de următoarele efecte: disforie, hipertonică, tahicardie, tahipnee și convulsii epileptice. Naloxonul este citat ca antagonist.

5. **Receptorii Epsilon** sunt înalt specifici pentru legarea beta-endorfinei.

Atât substanțele opioide exogene (naturale sau sintetice), cât și cele endogene (endorfinele) se cuplează stereospecific cu receptorii opioizi în sistemul nervos central și alte țesuturi, numai forma levogiră a acestor substanțe demonstrând activitate agonistă.

Afinitatea celor mai mulți agoniști pentru receptori este corelată cu puterea lor analgezică, care de altfel crește odată cu rata ocupării situsurilor receptoare. Starea ionizată a opioidelor apare ca necesară pentru realizarea unei legături puternice pe situsul anionic opioid receptor.

Acțiuni: opioidele pot prezenta atât acțiuni inhibitoare (predominant), cât și acțiuni stimulatorie, în funcție de teritoriul unde acționează și de participarea cAMP sau a unor fosfolipide membranare.

Acțiunile inhibitoare (mai ales cele analgezice), apărute ca urmare a legării unui agonist opioid exogen sau endogen, sunt explicate prin stimularea unității de reglare a receptorului [proteina G – subunitatea inhibitoare (Gi)] care scindează GTP în GDP, inactivând unitatea catalitică a receptorului, respectiv adenilata ciclaza (Simmn și Hiller, 1978). Urmează scăderea formării de cAMP, însoțită de modularea concentrației calciului citosolic și scăderea activității protein kinazelor cAMP-dependente, dublată de reducerea doz-dependență a fosforilării proteinelor celulare.

Acționând la nivel presinaptic, peptidele opioide modifică eliberarea altor neurotransmițători, ca, de exemplu, acetilcolina, dopamina, noradrenalina, substanța P, prostaglandinele. Reducând transmisia colinergică în sistemul nervos central prin reducerea eliberării de acetilcolină la nivelul terminațiilor nervoase, opioidele au un rol important în analgezie și în alte efecte opioid-dependente.

Toate aceste efecte sunt suprimate de naloxon, ceea ce dovedește mediația lor prin receptori opioizi. Același efect de suprimare, dar însoțit de stare de agitație marcată („wet-dog shake”), se obține prin administrare de naloxon la animale care au primit cronic intracerebro-ventricular enkefalina sau endorfine (sindrom de abinență).

Având în vedere implicarea opioidelor endogene în comportamentul motor, psiho-afectiv și psiho-senzorial, s-au obținut dovezi privind participarea lor în mecanismul psihozelor endogene (schizofrenie și psihoze afective).

Un rol important îl au, de asemenea, în comportamentul alimentar, prin activarea receptorilor diazepinici care, la rândul lor, ar stimula ingestia de hrană cu apariția obezității.

Alte acțiuni sunt realizate la nivelul aparatului respirator (tuse, vomă, bradipnee), cardio-vascular (hipotensiune, bradicardie), digestiv (miorelaxant, antisecretor, spastic duodenal, constipație prin efect contracturant), în funcție de doză.

Degradarea (inactivarea) opioidelor endogene se realizează asemănător acetilcolinei, mai curând enzimatic decât prin recaptare. După eliberare, enkefalinele sunt rapid degradate (40–60 s) și efectiv inactivate cel puțin de două endopeptidaze. Una din acestea este o aminopeptidază nespecifică, denumită enkefalinază, larg răspândită în țesutul nervos, care hidrolizează extremitatea N-terminală a enkefalinelor.

Inactivarea endorfinelor se face mult mai lent, după câteva ore de la eliberare, configurația lor spațială nepermițând atacarea cu ușurință a extremității N-terminale; cu cât lanțul lor este mai scurt (endorfinele alfa și gamma), cu atât sunt mai ușor clivabile.

4.2.5. SUBSTANȚA P

Substanța P (SP), descoperită de von Euler și Gaddum (1931), este un polipeptid format din 11 aminoacizi, prezent în sistemul nervos central și cel periferic, celulele enterocromafine ale tubului digestiv, terminațiile dendritice din piele, tractul genito-urinar, având funcții de hormon local și neuromediator.

Cele mai dense concentrații de SP există în terminațiile nervoase din straturile 1-3 ale cornului medular dorsal, nucleul senzitiv trigeminal și al tractusului solitar, substanța neagră din trunchiul cerebral și ceva mai reduse în ganglionii bazali, amigdală, habenulă, hipotalamus, talamus. Unele din aceste structuri sunt și locuri de plecare ale unor căi SPergice: conexiuni cortico- și reticulo-spinale ce sfârșesc în cornul ventral, fibre de legătură între habenulă și neuronii dopaminergici din nucleul interpeduncular și fibre striato-nigrice.

SP este sintetizată la nivelul aparatului ribozomal neuronal și transportată axonal. Eliberarea (calcium-dependentă) poate fi blocată presinaptic la nivelul terminațiilor SPergice de către opioide endogene și GABA în structurile nervoase și activată atât de unele substanțe chimice exogene (în mod deosebit capsaicina), cât și de stimularea fibrelor nervoase ale trigemenului, nervilor cutanați și fibrelor parasimpatice intestinale.

Inactivarea se realizează cu ajutorul unor enzime catabolizante, mai ales în Jesutul renal (tubi și vase renale).

Cercetările sugerează existența a două tipuri de receptori: receptori de tip A, responsabili pentru activitatea neurotropică a SP, și receptori de tip B, care răspund de acțiunile biotrofile ale acestui peptid.

SP este cunoscută ca neuromodulator pe sinapsele neuronale intranevraxiale (medulare), ca și pe sinapsele colinergice sau adrenergice ale unor structuri nervoase și endocrine periferice, cu efecte excitatoare sau inhibitoare în funcție de cantitatea de SP eliberată. Ea intervine în această calitate ca modulator al comportamentului la durere, al setei, al activității locomotorii, precum și în eliberarea unor hormoni din glandele endocrine clasice și ai sistemului APUD.

Efectele SP la nivelul Jesutului neuronal sunt mai ales de tip excitator, determinând prin acest mod de acțiune depolarizarea neuronilor postsinaptici din cornul dorsal medular, unele structuri cerebrale (amigdală, neuroni motori corticali, habenulă) sau ganglionare (nucleul senzitiv al trigemenului); efectele reglatoare sunt cel mai frecvent legate de medierea durerii (favorizarea transmiterii), fiind, alături de opioidele endogene (blocați presinaptici ai SP), una din substanțele-cheie în mecanismul de „gate-control” la nivel medular și supramedular.

În același timp însă, SP are și un important efect antistres, fiind capabilă să inhibe aproape complet tulburările funcționale induse de stresul cronic; acest efect se datorează acțiunii SP la nivelul medulosuprarenalelor, de reducere a eliberării de catecolamine, care explică și efectul hipotensiv pe care îl are peptidul la animalele cu hipertensiune arterială spontană.

Alte acțiuni la nivel central și periferic privesc stimularea eliberării de hormoni hipotalamo-hipofizari (LHRF, LH, TSH, STH), pancreatici (insulina), corticosuprarenali (glucocorticoizi) sau ai sistemului APUD (celele secretoare de renină, celule din plexurile Meissner și Auerbach).

SP participă, de asemenea, la realizarea homeostaziei apei în organism, atât prin efect ADH-eliberator, cât și prin acțiunile ei proprii la nivel renal (vasodilatatoare, diuretice și natriuretice).

Efecte puternice de mediere sunt cunoscute asupra musculaturii netede vasculare (factor de relaxare prin acțiuni vasodilatatoare antidromice și permeabilizante vasculare directe sau prin mecanism histaminoeliberator) și digestive (contracturant intestinal).

14.2.6. NEUROTENSINA

Neurotensina a fost izolată de Carraway și Leeman (1973) și reprezintă un tridecapeptid (13 AA), cu partea C-terminală activă, răspândit în sistemul nervos central și glandele anexe ale creierului (girusul parahipocampic, amigdală, substanța nigra, corpii striați, hipotalamusul anterior și posterior, talamus, trunchiul cerebral, bulbul olfactiv, substanța gelatinoasă a nucleului trigemenului, stratul 2 Rexed, bipofiză), precum și în mucoasa intestinului subțire.

Peptidul acționează atât ca neurohormon, cât și ca neuromodulator. Dintre efectele periferice datorate acțiunii pe receptori specifici sunt mai bine cunoscute cele hipotensive, prin relaxarea musculaturii netede vasculare.

La acestea se adaugă acțiuni cardiace inotrop- și cronotrop- pozitive la anumite specii animale, relaxarea sau contracția musculaturii netede a intestinului subțire în funcție de tipul de mușchi, hiperglicemia prin stimularea eliberării de glucagon și inhibarea eliberării de insulină, efecte metabolice (hipercolesterolemie prin participare la absorbție intestinală a colesterolului) și antiinflamatoare, ca agent chemotactic mastocitar și neutrofil.

Efectele centrale sunt exprimate, la rândul lor, prin acțiuni stimulative asupra eliberării de LH, FSH, ACTH în calitate de posibil factor eliberator hipotalamic. De asemenea, îi sunt descrise efecte comportamentale: antinociceptive, tranchilizante, sedative, și hipotermizante.

Efectul antinociceptiv a fost confirmat prin administrare generală, intracerebro-ventriculară și subarahnoidiană, și se datorează fragmentului C-terminal, o contribuție importantă având-o aminoacidul arginină în poziție dublă, 8 și 9, efect în care parțial este implicată și veriga opioidă.

14.2.7. FACTORUL NATRIURETIC ATRIAL

Cercetările din ultimele două decenii au stabilit că în afara rolului său de pompă cardiacă aspiro-respingătoare, inima îndeplinește și rol de organ endocrin. Ea eliberează hormonul peptidic denumit atriopentin (ANP – *atrial natriuretic peptide*), sau factorul natriuretic atrial (ANF), alături de alte peptide hormonale cu funcții insuficient cunoscute (VIP, neurotensina, substanța P).

ANP este secretat din granulele cardiocitelor atriale de mamifer, inclusiv umane, sub influența distensiei auriculare. Cea mai mare cantitate provine din celulele urechiușelor atriale drepte și stângi. El este un peptid format din 28 de aminoacizi, cu greutate moleculară de 3 060 de daltoni, eliberat dintr-un precursor inactiv cu 100 de aminoacizi în lanțul polipeptidic (vezi fig. 6.8).

Datorită rezolvării aspectelor legate de clonare și secvențare a genei ANP, astăzi este posibilă sinteza hormonului atât pe cale chimică, cât și prin inserția genci într-o levură sau bacterie.

Excitantul fiziologic al eliberării sale este reprezentat de stimularea receptorilor de întindere (*stretch receptors*), dată de întoarcerea venoasă crescută (de exemplu, efortul fizic, ingestia crescută de lichide) sau de către distensia auriculară secundară bolilor vasculare.

Lansat în circulație, ANP acționează asupra inimii, vaselor, rinichilor, glandelor suprarenale, creierului și altor organe, producând în principal modificări cardio-vasculare și hidroelectrolitice compensatoare, în vederea contracțurării efectelor date de factorii ce au declanșat distensia auriculară.

Principalele acțiuni biologice ale ANP se exercită la nivel renal direct și indirect. Pe cale directă hormonul exercită un efect de scurtă durată asupra mecanismului de epurare a sângelui de către glomerul, crescând permeabilitatea membranei glomerulare și permițând astfel eliminarea unei cantități mai mari de Na și apă.

La nivelul tubilor distali, ANP diminuează reabsorbția de sodiu și apă. Pe cale indirectă hormonul inhibă atât secreția de renină de la nivelul aparatului juxtaglomerular, cât și proprietatea aldosteronoeliberatoare a angiotensinei (diminuare între 40–70%), dublându-și pe această cale efectele diuretice.

ANP inhibă de asemenea și direct sinteza de aldosteron la nivelul corticosuprarenalei.

O altă proprietate importantă a peptidului este aceea de relaxare a celulelor musculare în tot sistemul vascular și de puternică inhibare a efectelor vasoconstrictoare ale angiotensinei și noradrenalinei pentru o durată de 30–80 de minute.

Administrarea de ANP determină dilatarea arterelor mari (arterele vertebrale, femurale, carotide primitive și coronare). Acțiunea vasodilatatoare este mai marcată asupra arterelor mici renale.

Efectul relaxant vascular poate avea loc atât prin interesarea endoteliului, dar mai ales a celulelor musculare, căci dilatația persistă pe un preparat vascular cu endoteliu înlăturat.

Modul de acțiune asupra fibrelor musculare netede pare să interfereze fie cu intrarea calciului în celulă, fie cu redistribuirea intracelulară a acestui ion. Mecanismul pare de natură indirectă, prin activarea guanozin monofosfatului ciclic (cGMP), mesager secund care preia semnalul de la ANP cuplat cu

receptori specifici membranari, acest nucleotid crescând semnificativ în plasmă și urină în cazul injectării hormonului.

În același timp, studiile experimentale arată că ANP se fixează în corpul ciliar, asigurând reglarea presiunii oculare, precum și în structuri nervoase care intervin în reglarea presiunii arteriale și a volumului de apă, a concentrației de sodiu și potasiu din organism. La aceasta se adaugă acțiunea de inhibare a sintezei de vasopresină.

În prezent se discută în literatură existența unei adevărate familii de peptide natriuretice atriale cu receptori specifici (atriopeptin I, II și III, cu respectiv 21, 23 și 24 de aminoacizi), reprezentând secvențe mai scurte sau mai lungi ce rezultă din metabolismul ANP, care este forma majoră circulantă, dar nu obligatoriu și cea mai activă la un moment dat.

Aceste fragmente (AP I, AP II, AP III) au acțiuni parțial comune, dar și diferite (de exemplu, AP I manifestă acțiuni coronaroconstrictoare, în timp ce AP II este un potent agent coronarodilatator).

Gradul și viteza de metabolizare a ANP în produși cu unele acțiuni antagoniste față de „substanța-mamă” reprezintă o posibilitate de „acord fin” intrinsec al acestui sistem în vederea realizării homeostaziei debitului sanguin la nivelul organelor, presiunii arteriale, volemiei și concentrației electroliților.

În insuficiența cardiacă congestivă și hipertensiunea arterială, secreția de ANP crește compensator în vederea contracțării dezechilibrului cardio-vasculare și volemice. Tratamente efectuate în acest sens la bolnavii cardiaci s-au soldat cu unele rezultate promițătoare.

Efortul fizic determină creșterea eliberării în paralel atât a ANP, cât și a angiotensinei și aldosteronului, dar din motive diferite: creșterea întoarcerii venoase cu stimularea receptorilor de întindere atrială și respectiv stimularea aparatului juxtaglomerular, datorată activării simpatice din efort.

14.2.8. LEPTINA

Leptina este o proteină hormonală cu greutate moleculară de 16 kDa, secretată în circulație de adipocitele albe ale țesutului adipos la șoarecele cu adipozitate genetică (Kline și colab., 1997). Ulterior, gena secretoare de leptină a fost identificată în alte țesuturi și organe (ficat, mușchi, hipotalamus) nu numai la rozătoare, ci și la om.

Pe plan funcțional, s-a stabilit că leptina participă la autoreglarea centrală a sațietății, ca factor hormonal reglator al sațietății și al balanței energetice a organismului. S-a constatat că leptina plasmatică scade în condițiile deficitului alimentar energetic și crește semnificativ după ingestia exagerată de alimente printr-un mecanism compensator în care este implicat neuropeptidul NPY hipotalamic, ca factor cotransmițător al mediației adrenergice centrale.

O componentă reglatoare periferică este sugerată de influența inhibitoare a leptinei asupra secreției de insulină și cortizol prin intermediul unor receptori glandulari specifici.

Ca neurohormon reglator al ingestiei de alimente și sațietății, cercetările asupra leptinei deschid noi perspective bazelor teoretice și practice ale tratamentului obezității.

14.3. HORMONII LOCALI LIPIDICI

Deși primele cunoștințe despre prostaglandinele din lichidul seminal datează de peste 70 de ani, cercetări sistematice asupra lor nu au apărut decât în ultimele decenii, când școala suedeză a reluat cercetările asupra structurii și efectelor fizio-farmacologice ale acestora. După ce Bergström a stabilit că acestea derivă din acizii grași polinesaturați cu 20 de atomi de carbon monocarboxilici, s-a constatat că biosinteza lipidelor biologic active se realizează în trepte, cu participarea endoperoxizilor intermediari în numeroase alte țesuturi și organe. Ulterior, au fost identificate enzimele care transformă acizii arahidonic, linolenic și linoleic în prostaglandine, prostaciline, tromboxani și leucotriene. S-a precizat că celulele neavând stocuri de precursori, enzima cu rol esențial în eliberarea de acizi grași polinesaturați din

fosfolipidele membranare este fosfolipaza A₂. Acidul arahidonic rezultat este transformat mai întâi în endoperoxizi, sub influența ciclooxygenazei, pentru ca din aceștia să se formeze prostaglandinele, prostacilinele și tromboxanii, cu ajutorul sintetazelor respective. Pe calea lipoxigenazei iau naștere din aceiași acizi grași polinesaturați leucotrienele, având ca treaptă intermediară acizii hidroperoxieicosatetraenoici (5-HPETE, 12-HPETE, 5-HETE etc.).

Sinteza celor peste 20 de lipide biologic active identificate până în prezent și onorate cu premiul Nobel pe anul 1982 este prezentată în fig. 14.8.

În ultimii ani a fost descrisă o nouă cale de metabolizare a acizilor grași polinesaturați formatoare de lipoxine, ale căror structură și acțiuni biologice sunt în studiu. Sistemele enzimice formatore de hormoni locali sau autacoizi lipidici găsindu-se în majoritatea țesuturilor și organelor, distribuția prostaglandinelor (A₁, A₂, B₁, D₁, E₁, E₂, F₂, etc.), prostacilinelor (PGI₁, PGI₂), tromboxanilor (TXA₂, TXB₂) și leucotrienelor (LTA₄, LTB₄, LTC₄, LTD₄) este larg răspândită în întregul organism. Principalul lor rol biologic este modularea diverselor forme de activitate celulară.

La nivelul aparatului genital feminin, prostaglandinele PGA, PGB și mai ales PGE provoacă relaxarea uterului negravid, în timp ce prostaglandia PGF_{2α} determină contracția puternică a miometrului atât în timpul, cât și în afara sarcinii. În general, sensibilitatea mușchiului uterin față de prostaglandine este dependentă de statusul endocrin al femeii. Fluctuații mari au fost constatate în timpul diferitelor faze ale ciclului ovarian, răspunsurile cele mai ample observându-se în jurul perioadei de ovulație. Efectul relaxant al PGE₁, de exemplu, este de 3-5 ori mai pronunțat în momentul ovulației. La rândul lor, prostaglandinele PGF_{2α} produc atât contracția miometrului, cât și a trompelor uterine. Prostaglandinele din spermă influențează dinamica uterină și tubară, facilitând progresia spermatozoizilor spre trompă în vederea fecundării ovulului.

În timpul sarcinii crește PGF_{2α} la nivelul uterului și lichidului amniotic. Avorturile provocate prin administrare intraamniotică de NaCl în soluție hipertonică se datoresc activării fosfolipazei A lizozomale și formării de prostaglandine, mai ales PGF_{2α}.

Asupra aparatului circulator, hormonii locali lipidici acționează, de asemenea, în mod diferit, în funcție de structura chimică a acestora. Serii A și E produc efecte vasodilatatoare și hipotensoare, datorită dilatației arteriolo-capilare.

Concomitent cu scăderea presiunii sanguine, debitele cardiac, renal și coronar cresc cu până la 25%.

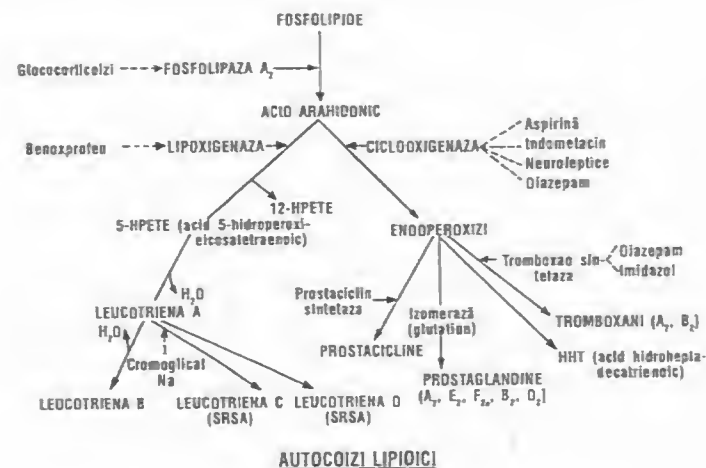


Fig. 14.8. Biosinteza hormonilor locali lipidici.

Contrar PGA și PGE, prostaglandinele din seria F sunt vasoconstrictoare. Prostaglandinele seriilor A și E inhibă secreția gastrică provocată de ingestia de alimente sau histamină.

Musculatura bronșică se relaxează sub influența prostaglandinelor din grupa E, în timp ce prostaglandinele serii F și leucotrienele C și D sunt bronhoconstrictoare.

Plămânii reprezintă un loc important de sinteză și metabolizare a prostaglandinelor. Atât hiperventilația, cât și hipoxia cresc eliberarea de prostaglandine bronho-pulmonare. La rândul său, inactivarea se realizează în proporție de 80-90% la o singură trecere prin vasele pulmonare, în afara modificărilor vasculare locale, prostaglandinele participă la reglarea bronhomotricității, alături de ceilalți factori neuro-umoral. În timp ce prostaglandinele din grupul E au efect bronhodilatator, prostaglandina $\text{PGF}_{2\alpha}$ este puternic bronhoconstrictoare. Din această categorie fac parte și leucotrienele. Cercetările recente au demonstrat, de altfel, că SRSA (*Slow Reacting Substance of Anaphylaxis*) este un amestec de leucotriene C și D.

Efecte interesante exercită hormonii locali lipidici și la nivelul glandelor endocrine, altele decât cele care aparțin sferei pelvine. Astfel, prostaglandinele serii E stimulează sinteza de coloid tiroidian, captarea și fixarea iodului pe suportul proteic prin mecanismul activării adenilat ciclazei și formării de cAMP. Se pare că TSH hipofizar activează sinteza de prostaglandine la nivelul celulelor tiroidiene. Efecte similare au fost descrise și la nivelul glandelor paratiroide. Steroidogeneza suprarenală stimulată de ACTH este, de asemenea, prostaglandin-dependentă. La nivelul complexului hipotalamo-hipofizar s-au găsit mari cantități de prostaglandine din seriile A și E, cu rol modulator fie asupra transmisiei sinaptice, fie în eliberarea hormonilor hipofizari. Injectate intraventricular, prostaglandinele produc eliberare de ACTH, STH, LH și prolactină, însoțite de efecte neuro-sedative și pirogene generale. Atribuindu-li-se un oarecare rol în modularea reglării termice, s-a presupus că antipireticele interferează cu eliberarea de prostaglandine hipotalamice. S-a constatat că febra indusă de substanțele pirogene crește sinteza de PGE_1 la nivelul centrilor termoregulatori hipotalamici, iar antipireticele (aspirină, indometacin etc.) inhibă formarea acesteia. Eliberarea catecolaminelor și acetilcolinei este, de asemenea, inhibată. Pe plan metabolic, prostaglandinele exercită efecte antilipolitice, reducând eliberarea glicerolului și acizilor grași din țesutul adipos, și împiedică acțiunea lipolitică a catecolaminelor, ACTH, TSH, STH, glucagonului și teofilinei. La baza acestor efecte stă scăderea cAMP intracelular, produsă de inhibarea adenilat ciclazei membranare. În comparație cu modificările metabolismului lipidic, cele ale glucidelor sunt mai puțin importante. De menționat doar hiperglicemia tranzitorie produsă prin acțiunea directă, glicogenolitică, a PGE_1 la nivelul celulei hepatice și stimularea reflexă a eliberării de catecolamine, ca urmare a hipotensiunii induse de prostaglandina respectivă.

Asupra creșterii celulare, prostaglandinele acționează prin intermediul cAMP și ADN, cu participarea ionilor de calciu. PGE_1 , de exemplu, crește incorporarea de baze purinice și pirimidinice în nucleotide, determinând proliferarea timocitelor. La rândul său, stimularea sintezei de ADN inhibă efectele metabolice ale prostaglandinelor, asigurând echilibrul creșterii și diviziunii celulare. În neoplazii, acest echilibru devine inefficient, ducând la creșterea prostaglandinelor la nivelul țesutului tumoral. În general, hormonii locali lipidici dețin un rol important în asigurarea stabilității membranelor lipoproteice celulare și intracelulare. Fiind ele însele lipide, modifică tensiunea superficială la nivel membranar. Prostaglandinele E exercită o puternică acțiune stimulatorie a transportului activ transmembranar de Na^+ , K^+ , Cl^- și Ca^{2+} . Influențând transportul activ al diversilor ioni atât la nivelul membranei celulare, cât și la nivelul organelor celulare, prostaglandinele participă la menținerea concentrației ionice optime la nivel intracelular.

Datorită distribuției și efectelor biologice multiple, hormonii locali lipidici sunt implicați ca factori patogeni în numeroase stări patologice. Dintre afecțiunile în care participarea acestora a fost dovedită fac parte: inflamații acute și cronice cu toate localizările cunoscute, afecțiunile cardio-vasculare (hipertensiune arterială, angină pectorală și infarct miocardic), afecțiunile genitale feminine (avort spontan, tulburări ale travaliului, hemoragii menstruale) și masculine (infertilitate, lipsa orgasmului), bolile gastro-intestinale (ulcer gastric și duodenal, rectocolită ulcerohemoragică), afecțiunile hematologice (tulburări de agregare plachetară) și imunologice (stări alergice de tip astmatic, cutanat, artritic etc.).

În reacțiile inflamatoare, de exemplu, se produce o creștere mai întâi a prostaglandinelor PGE_1 și apoi PGF . Primele contribuie la modificările de permeabilitate vasculară locală, potențând efectele dilatatoare și permeabilizante ale bradikininei.

Totodată, ele favorizează procesul de chemotactism leucocitar.

Prostaglandinele $\text{PGF}_{2\alpha}$ intervin ulterior pentru a limita efectele acestora.

Spre deosebire de prostaglandine, prostacilinele și tromboxanii intervin cu rol determinant în agregarea plachetară. În timp ce prostacilinele PGI_1 și PGI_2 posedă proprietăți vasodilatatoare și antiagregante, tromboxanii sunt prevăzuți cu acțiuni puternice constrictoare și agregante ale plachetelor sanguine. Formarea lor exagerată în condiții de ischemie și hipoxie contribuie la hipercoagulabilitatea sângelui și la trombozarea vaselor sanguine generatoare ale tulburărilor de irigație de diferite grade.

La rândul lor, leucotrienele, rezultate din acțiunea lipoxigenazei asupra acidului arahidonic, participă mai ales la reacțiile umorale din inflamație și anafilaxie. Acumularea leucocitelor în focarul inflamator se datorește participării predominante a leucotrienei B_4 . Lipoxigenaza, găsindu-se din abundență în leucocite, formează leucotriene la locul lor de migrare, nu ca produs al procesului inflamator, ci ca mediator al inflamației!

În reacțiile anafilactice de la nivelul căilor aeriene, leucotrienele intervin ca factori locali puternic constrictori ai musculaturii bronșice. Acțiunea bronhoconstrictoare a acestora este de mii de ori mai intensă decât a histaminei și $\text{PGF}_{2\alpha}$. De aceea, leucotrienele sunt considerate ca principalul mediator al fenomenelor clinice din astmul bronșic.

Rolul fiziologic și implicațiile fiziopatologice ale lipoxinelor sunt insuficient cunoscute deocamdată.

15. FIZIOLOGIA REPRODUCERII, NAȘTERII ȘI DEZVOLTĂRII NEONATALE

Înmulțirea și perpetuarea speciei se realizează la mamifere și om în perioada de maturare sexuală prin acte reflexe și comportamentale specifice sexului, determinate de variațiile hormonilor gonadali circulanți.

Funcțiile de reglare neuro-endocrină a gonadelor femele și masculine fiind prezentate anterior, în cele ce urmează vor fi trecute în revistă bazele fiziologice ale comportamentului sexual, gestației și dezvoltării neonatale, pe de o parte, și ale travaliului și lactației, pe de altă parte.

15.1. COMPORTAMENTUL SEXUAL

Comportamentul sexual este un complex de reacții somato-vegetative și comportamentale legate de stimularea organelor genitale și de copulația heterosexuală. El are la bază acte stereotipe innăscute, modulate de diverși factori psiho-sociali și experiența anterioară, cu rol fundamental.

Comportamentul copulator se realizează ca urmare a fenomenelor de excitare sexuală, întregite de reflexul de ejaculare. La animale, comportamentul sexual este instinctiv, în timp ce la om apare ca un proces premeditat, deliberat, conștientizat într-o oarecare măsură, cu participarea unor factori de mediu care țin de condiții sociale, de psihologie și etică, având o anumită componentă psiho-afectivă în afara celei neuro-hormonale. Nu există criterii obiective de apreciere a comportamentului sexual. Se urmăresc totuși unii parametri, cum ar fi: numărul ejaculărilor într-un anumit timp sau durata perioadei refractare. În general, comportamentul sexual al masculului este de o mai mare complexitate atât în cazul animalelor, cât și al omului.

Masculul, pentru a-și finaliza comportamentul sexual, parcurge o serie de etape – de recunoaștere a partenerei, de orientare în mediu, de montă și ejaculare.

Comportamentul sexual, ca și celelalte forme ale comportamentului (alimentar, de apărare), are la bază procesul motivației sexuale, care îmbracă aspectul de libido. La rândul său, motivația sexuală reprezintă o *latură dinamogenă* innăscută, determinată de participarea complexului neuro-endocrin, cu tendință la perfecționare pe măsura acumulării experienței de viață, și o *latură direcțională* innăscută la animalele inferioare și dobândită la om, în funcție de stimulul ce o declanșează și de experiența anterioară.

Sub influența hormonilor sexuali are loc dezvoltarea morfologică și excitabilitatea organelor genitale, ducând la exprimarea comportamentului erotic și sexual, prin acțiunea androgenilor la nivelul ariei preoptice. La băieți, creșterea secreției de testosteron în timpul nopții produce și întreține masturbatia și ejacularea. Interesul sexual este mai pronunțat la băieți cu valori crescute ale testosteronului, ceea ce explică relațiile sexuale mai precoce și mai frecvente la aceștia. La băieți, un rol predominant în erotism îl joacă stimulii vizuali și imaginația, factori mai puțin importanți pentru fete, dar la care relația cu alte fete ce au deja experiență sexuală poate declanșa viața sexuală și din curiozitate.

La fete, valoarea progesteronului plasmatic este invers proporțională cu apariția masturbației, precocitatea vieții lor sexuale fiind influențată de valoarea LH, a hormonilor sexoizi corticosuprarenali. Comportamentul sexual feminin este mai ușor de controlat față de cel masculin, când intervine inhibiția morală, socială, culturală, iar cea hormonală rămâne pe al doilea plan. Maturizarea sexuală la fete este mai rapidă decât la băieți și poate crea probleme familiale, sociale, morale, religioase.

Există și pubertatea întârziată, când se observă un dezechilibru între vârsta calendaristică și cea psihosexuală, de multe ori hipogonadismul fiind asociat cu tulburările psihice și comportamentale. Castrarea postpuberală reduce volumul ejaculării și calitatea orgasmului, în timp ce erecția și libidoul persistă un timp, simptomatologie care se ameliorează la adult sub tratament hormonal de substituție.

Homosexualitatea exprimă o modificare a orientării sexuale, de obicei inversabilă, care se poate asocia uneori și cu modificarea identității de rol sexual.

La homosexuali secreția de testosteron este normală, dar s-ar putea să fie perturbată metabolizarea în creier a testosteronului.

Lesbienele nu au concentrații mai mari de testosteron plasmatic, dar s-a constatat că răspunsul LH la administrarea de estrogeni este mult mai redus.

Studii mai recente aduc în discuție prezența unor factori biologici prenatali care ar produce dimorfismul sexual al creierului și faptul că homosexualitatea nu ar fi un „pseudhermafroditism pur cerebral”.

Sexul psihologic al individului se conturează la vârsta de aproximativ doi ani, prin influența factorilor de mediu (îmbrăcăminte diferită pentru fete și băieți, imprimarea unor obiceiuri copiilor de către adulți, specifice unui sex sau altuia etc.).

Motivația sexuală apare manifestă la om după contactul său cu anumiți excitanti exogeni prezenți sau doar imaginari, la care se adaugă impregnarea hormonală a formațiunilor nervoase ajunse la maturitatea anatomică și funcțională.

Fasciculul median al creierului anterior pare implicat în motivația sexuală, ca și în celelalte aspecte ale acesteia. Implantarea la animale a unor microelectrozi de excitare în această zonă creează senzația de reală plăcere, încât animalul apasă pe pedala care-i declanșează excitarea, de mii de ori într-o oră, uitând să-și manifeste restul comportamentelor fundamentale (nu mai mănâncă, suportă stimulii durerii etc.). În explicarea acestei reacții motivaționale se includ formațiuni nervoase care aparțin mezencefalului și hipotalamusului lateral, spre deosebire de reacțiile de neplăcere produse cu participarea hipotalamusului posterior, a mezencefalului și a sistemului limbic. La nivelul acestora, se descrie așa-zisul „sistem de recompensă” și „sistemul de pedepsă”.

Implantarea unor electrozi cronici de stimulare în zona septală la oameni a realizat senzații de plăcere, dispariția stării de tensiune nervoasă, senzație de bucurie și extaz.

Din punct de vedere al motivației sexuale, masculul este mai dependent de factorii exogeni decât femela, pentru că diversele semnale emise de aceasta sub forma unor sunete, a unor mirosuri specifice trezesc comportamentul sexual al masculului, la care se adaugă și gradul de impregnare a formațiunilor nervoase rinencefalice cu hormoni androgeni.

Aceleși formațiuni nervoase sunt implicate și în comportamentul sexual, ca și în celelalte tipuri de comportament reprezentate de diencefal, de trunchi cerebral și sistem limbic.

Animalul castrat este capabil de comportament sexual mai evident sau mai apăsător, în funcție de experiența anterioară.

Ovariectomia realizează dispariția imediată a receptivității sexuale a femeiei, în timp ce castrarea nu blochează activitatea sexuală a masculului, iar ejacularea se menține în prezența femeiei la estru. Administrarea de androgeni ameliorează comportamentul sexual al masculului castrat, cu revenirea progresivă a componentelor actului copulator.

Dacă masculului castrat i se administrează estrogeni și progesteron, nu se constată apariția unui comportament sexual feminin, în timp ce, după ovariectomia femeiei adulte, administrarea de androgeni reproduce comportamentul sexual specific masculului, scoțând în evidență în special rolul androgenilor pentru diferențierea sexuală a comportamentului.

Lipsa hormonilor androgeni menține totuși comportamentul sexual la maimuță și om, spre deosebire de celelalte mamifere, la care dispare. Comportamentul sexual la primat și om se învață pe parcursul vieții, apare mai puțin a fi înăscut, iar prezența indivizilor heterosexuali în ambianță este un factor deloc de neglijat pentru trezirea motivației sexuale. Pubertatea și, în general, maturizarea sexuală depind și de factorii educaționali, de condițiile oferite de urbanizare, cultură și alimentație.

Copiii din mediul urban prezintă o maturizare sexuală mai precoce decât cei din mediul rural, primii având mai intens stimulat axul hipotalamo-hipofizar de către condițiile vieții moderne, ceea ce va duce la sinteza și secreția mai precoce a gonadotropilor hipofizari.

Factorii senzoriali prezintă un interes deosebit în apariția și manifestarea comportamentului sexual. Printre aceștia figurează stimulii plecați de la zona cutanată a organelor genitale, stimulii olfactivi, vizuali și auditivi sau cei care reprezintă o anumită relație socială.

Suprimarea vederii, a olfecției și auzului la animale a dus la dispariția activității copulatorii (iepure, cobai, pisică), după cum dezaferentarea organelor genitale a redus manifestările comportamentului sexual al masculului.

Încă din viața intrauterină, androgenii secretați de către testiculul fetal vor acționa asupra hipotalamusului pentru a organiza comportamentul sexual masculin, dar, în același timp, vor diferenția și tractul genital masculin.

Dacă se administrează androgeni fătului feminin, apar semne de pseudhermafroditism și dezvoltarea comportamentului masculin.

Studii efectuate pe fătul uman au arătat că hipotalamusul este diferențiat sexual între lunile a 4-a – a 7-a ale vieții intrauterine și că testosteronul imprimă secreția aciclică a gonadotropilor hipofizari printr-o diferențiere tipică masculină a hipotalamusului.

Până în luna a 4-a, hipotalamusul secretă în mod continuu factori eliberatori pentru gonadotropi, iar dacă, după această vârstă a sarcinii, intervine secreția estrogenică, diferențierea sexuală feminină a hipotalamusului va determina eliberarea ciclică a gonadotropilor, proces specific sexului feminin.

Spre deosebire de animale, bărbatul adult normal tratat cu exces de androgeni va prezenta un grad redus de hipersexualitate, iar cel homosexual sau heterosexual tratat cu estrogeni va prezenta mai întâi o reducere a nivelului plasmatic de LH iar, mai târziu, homosexualul va avea o creștere a concentrației plasmatice de LH. Acest ultim fapt experimental dovedește că homosexualul prezintă un cșer cu diferențiere de tip feminin.

Castrarea neonatală la ambele sexe are repercusiuni nefaste asupra diferențierii sexuale a sistemului nervos și, în special, a hipotalamusului, dovedind o dată în plus rolul hormonilor gonadali în acest proces. Administrarea de estrogeni în perioada de diferențiere a hipotalamusului duce la blocarea manifestării comportamentului sexual la ambele sexe, în timp ce lipsa androgenilor la femelă, mai mult decât prezența estrogenilor, realizează comportamentul sexual tipic feminin.

Din cele expuse reiese clar că androgenii acționează mai prompt în apariția comportamentului sexual la ambele sexe, că locul lor de acțiune este hipotalamusul implicat în acest proces. La primatle adulte și la om s-a dovedit intervenția androgenilor nu numai în organizarea nervoasă a comportamentului sexual, ci și în rolul activator al fazelor acestuia. Androgenii produc motivația sau pulsivitatea sexuală și asigură realizarea procesului copulator, dar, în același timp, produc manifestări și de alt ordin specific masculin, cum ar fi agresivitatea, spiritul de dominație, combativitate etc. Este frecvent întâlnit în clinica umană cazul bărbaților cu hipogonadism, tradus prin timiditate, greutate în ideeație, apatie – semne care dispar după tratamentul cu androgeni.

La animale și la om se aduc în discuție și alți hormoni cu rol în modularea comportamentului sexual. Implantate de estrogeni în iminența mediană a masculului reduc comportamentul sexual, probabil prin intermediul prolactinei, a cărei concentrație s-a găsit crescută la aceste animale.

Injectarea intravenoasă de ACTH a redus mult activitatea copulatorie a masculului, dovedind intervenția acestui hormon alături de cea a prolactinei în deprimarea comportamentului sexual.

La bărbații adulți, dozele mari de prednison (peste 30 mg/zi) pot produce oligospermie și inhibarea activității endocrine testiculare, prin prezența la nivelul testiculelor a unor receptori specifici pentru glucocorticoizi, plașaji în special pe celulele Leydig. Bărbații cu boală Cushing prezintă scăderea testosteronului plasmatic și a LH prin inhibarea acestora de către hipercoortizolemie.

Intervenția glandei tiroide în funcția gonadală este explicată de faptul că hormonii tiroidieni cresc secreția estrogenică și, în special, pe cea androgenică testiculară, că hipotiroidia se însoțește de hipogonadism (impotență sexuală, regresie histologică a testiculelor, scăderea libidoului la femeie și avort), sterilitate, în timp ce hipertiroidia nu se manifestă prin hipergonadism. Tratarea animalelor cu testosteron scade concentrația plasmatică de TSH și de hormoni tiroidieni, blocând alături de aceștia axul hipotalamo-hipofizar.

Intervenția neurohipofizei în reglarea activității gonadelor și, implicit, în finalizarea comportamentului sexual este puțin studiată. Se admite că oxitocina alături de prostaglandine și noradrenalină ajută la

transportul spermatozoizilor prin epididim, modulând contractilitatea acestuia. Administrarea de oxitocină atât la femelă, cât și la mascul a realizat intensificarea ovogenezei și spermatogenezei prin stimularea secreției de gonadotropi dar, în același timp, și creșterea în greutate a testiculelor.

În sfera umană s-au făcut dozări de oxitocină plasmatică la femeie în timpul suptului (constatându-se creșterea concentrației sale), cât și în timpul actului sexual. După orgasm, la femeie s-a pus în evidență creșterea activității oxitocinei, iar la bărbat nu s-a constatat nici o modificare a acestui hormon în timpul activității sexuale. Oxitocina, influențând nivelul hormonilor gonadotropi hipofizari, a fost implicată și în deficitul de fertilitate și sexualitate la bărbat, încât se folosește în clinica umană pentru stimularea secreției gonadotropilor și rezolvarea infertilității.

În afara sarcinii, uterul se contractă mai mult la vasopresină decât la oxitocină, în timp ce trompele prezintă activitate contractilă în special la oxitocină.

În timpul actului sexual, în organismul femeii se eliberează ambii hormoni, care au un rol important în ascensiunea spermatozoizilor spre trompele uterine, declanșând unde contractile la nivelul uterului și trompelor.

Iluminarea prelungită la păsări produce hipertrofia ovarelor, în timp ce, la șobolancă, unde ciclul estral este doar de 4 zile, ovulația apare la începutul nopții și poate fi blocată de iluminare. În explicarea rolului iluminării sau întunericului, cât și a ritmului nictemeral asupra funcției gonadale se aduce în discuție intervenția glandei epifize.

Epifiza dispune de o bogată inervație simpatică, prin intermediul căreia luminozitatea mediului ambiant constituie stimulul său fiziologic.

Noradrenalina eliberată la capătul fibrelor postganglionare va stimula pătrunderea triptofanului în celulele glandulare, cu activarea adenilat ciclazei din membrana acestora. cAMP format va induce activarea N-acetil transferazei, care catalizează trecerea serotonininei în N-acetil serotonină și a acesteia în melatonină sub influența hidroxiindol-O-metil-transferazei (HIOMT).

Melatonina – principalul hormon epifizar – are o structură apropiată de a serotonininei, care constituie principalul mediator chimic din mezencefal și care am văzut că acționează în mod inhibitor asupra funcției gonadale. Efectul antigonadal este mai evident la melatonină decât la serotonină.

Menținerea la întuneric a șobolancilor va realiza o creștere a concentrației melatoninei și a HIOMT, în timp ce greutatea ovarelor și secreția gonadotropilor adenohipofizari este redusă; iluminarea continuă are efecte inverse.

La om s-a descris pubertate precoce în cazul unor tumori epifizare sau blocarea gonadotropilor hipofizari în cazul unor hipersecreții de melatonină.

Arginin-vasotocina, octapeptid prezent atât în neurohipofiză, cât și în epifiză, exercită un efect inhibitor asupra organelor de reproducere, în special în faza prepuberală. Deficitul epifizar în acest hormon ar putea realiza hipergonadism prin lipsa efectului frenator epifizar asupra tractului hipotalamo-hipofizar pe linia gonadotropilor.

Observațiile pe om au adus în discuție date contradictorii în legătură cu comportamentul sexual din timpul ciclului ovarian la femeie, unele din acestea scoțând în evidență o exacerbare sexuală în faza ovulatorie, altele relatând aspecte de excitabilitate sexuală pronunțată spre sfârșitul ciclului ovarian, în faza imediat premergătoare menstruației. Aceste observații se bazează pe intervenția diverselor secreții hormonale asupra elementelor ovariene declanșatoare de hipersexualitate, în primul caz prin creșterea coecontracției plasmatice de LH.

Nu se cunoaște exact modul în care diversele *mirosuri* interesează comportamentul sexual, cert este că o serie de date experimentale pe animale au pus în evidență modificări ale duratei ciclului estral, cum este cazul șoricioaicelor, cărora li s-a provocat anosmie sau dacă a lipsit masculul din colonie.

La capră și la oaie, prezența masculului grăbește ovulația, după cum o șoricioaică poate avorta dacă este pusă alături de alt mascul decât cel care i-a produs sarcina.

La maimuță, mirosul dat de volatilizarea acizilor grași din vaginul femeii la estru, rezolțai prin alterarea florei bacteriene sub acțiune hormonală, produce din partea masculului un comportament mai evident de „meoajare” și de „îngrijire” a femeiei.

În clinica umană s-au descris cazuri de anosmie asociate cu ameeoree, după cum utilizarea unor anumite parfumuri poate constitui o cauză a atracției sexuale.

Comportamentul sexual este redus de serotonină și facilitat prin dopamină.

Stările anxioase reduc activitatea sexuală, după cum furia inhibă sau stimulează răspunsul sexual.

Excitația sexuală realizează efecte pozitive în plan afectiv, crescând admirația față de partener privind caracteristicile fizice și sexualitatea, are un caracter instabil în timp, putând fi blocată de factori externi (condiții de viață, atracția față de alt partener).

Temperatura influențează, de asemenea, activitatea gonadelor. Șobolancele expuse în ambianță rece vor prezenta prelungirea ciclului estral, fenomen în care se include și secreția crescută de TRH, dar a căruia intervenție nu se cunoaște.

Comportamentul matern este o parte constitutivă a celui reproducător. Include totalitatea manifestărilor organismului femeii, care precedă sau urmează apariția urmașilor.

Migrarea păsărilor sau a peștilor pentru depunerea ouălor, construirea de cuiburi la locuri adăpostite de intemperii, grija față de pui sunt doar câteva din reacțiile ce compun comportamentul matern.

Distrugerea sistemului limbic în diverse zone ale sale va duce la dispariția acestor manifestări, dovedind implicarea acestor formațiuni nervoase și în această formă de comportament, ca și în cel de apărare, sexual, de hrănire etc.

În totalitate, comportamentul reproducător asigură perpetuarea speciei. Implicațiile neuro-endocrine descrise au rol decisiv în exteriorizarea comportamentului reproductiv dar, la om, sunt intim legate de mediul, bio-psiho-social care-l modulează.

15.2. FECUNDAȚIA

Fecundația reprezintă procesul de unire a elementelor nucleare și citoplasmice a celor doi gameți – ovulul și spermatozoidul, prin pătrunderea în ovulul matur a spermatozoidului, fenomen ce duce la formarea oului diploid (zigotul).

Fecundația are loc în treimea externă a trompei uterine, în urma pătrunderii spermatozoidului în vagin în timpul actului sexual, de unde va traversa uterul, ajungând în trompe. Spermatozoidul se maturizează pe acest traseu. Uneori, fecundația are loc pe fața externă a ovarului, după care oul este adus în trompa uterină.

Un singur spermatozoid străpunge membrana vitelică pierzându-și flagelul, iar capul va da naștere pronucleului masculin.

Nucleul ovulului crește progresiv după eliminarea celui de al doilea globul polar și devine pronucleu feminin, ce se va atașa celui masculin. Unirea cromozomilor XX sau XY cu 44 de autozomi va da prima celulă diploidă, care, prin mitoză, va duce la formarea a două blastomere, iar în timpul migrării prin trompă se formează 4 și apoi 8 blastomeri. După 4 zile de la fecundație apar celule mici, ce se vor multiplica rapid, dând naștere trofoblastului, și celule mari, care prin aglomerare la un pol al oului vor forma discul embrionar.

Trompa este parcursă de către ou în aproximativ 4 zile, cu participarea peristaltismului tubar, a lichidului existent, a prostaglandinelor, catecolaminelor și hormonilor steroizi.

Ajuns în uter, oul se fixează în pereții uterini aproximativ după 7 zile de la fecundație, proces numit nidație. Uneori nidația are loc în trompă (sarcină extrauterină) sau în zona colului. Contactul membranelor trofoblastului cu endometrul se realizează sub influența hormonală (progesteron, prostaglandine), endometrul devenind *deciduă*.

Oul este separat de cavitatea uterină, deoarece orificiul de pătrundere în pereții uterini se închide prin depunere de fibrină și celule sanguine. Din ziua a 13-a – a 14-a are loc formarea placentei, apar vilozitățile coriale (primare, secundare și terțiare).

Fixat pe pereții uterini, oul se dezvoltă și va realiza legături funcționale cu circulația mamei.

În a 6-a săptămână de la fecundație începe perioada embrionară, de diferențiere și formare a țesuturilor și organelor, iar din a 8-a și a 12-a săptămână – stadiul fetal; în a 13-a săptămână sunt deja prezenți fătul și anexele sale (placenta, cordonul ombilical, lichidul amniotic).

Sarcina normală la om are o durată de 266–270 de zile (de la fecundația la naștere), perioadă care se împarte în trei trimestre, fiecare cu caracteristicile sale, metabolice și funcționale, atât pentru mamă, cât și pentru făt.

Există incompatibilități materno-fetale, cum ar fi cele din sistemul Rh, produse la femeile Rh negative cu soț Rh pozitiv, în care bemațiile fătului, fiind Rh pozitive, întâlnesc sângele matern (în circulația fetoplacentară) când induc formarea anticorpilor anti-Rh la mamă. În urma acestui fapt anticorpii anti-Rh trec bariera placentară, ajungând în circulația fetală, iar, din acțiunea antigen-anticorp, apare hemoliza sângelui nou-născutului, cu apariția anemiei, a icterului hemolitic, a icterului nuclear (resturi hematice se depun la nivelul diverșilor nucleu nervoși cu apariția tulburărilor de auz, văz, motricitate etc.), a anasarcei fetoplacentare etc.

Există și incompatibilitate în sistemul ABO, în cazul în care mama are grupă sanguină 0, iar fătul are grupa A sau B – situație în care hemoliza este redusă față de incompatibilitatea de Rh.

Infertilitatea poate fi de cauză feminină sau masculină (tulburări hormonale cu gametogeneză afectată, deficiențe imunologice, infecții și anomalii morfologice în sfera genitală, utilizarea metodelor contraceptive etc.) în care procesul biologic al reproducerii nu poate avea loc.

Procreația medicală asistată se utilizează tot mai frecvent la cuplurile infertile, prin inseminări artificiale (intervaginale, intracervicale, intrauterine – prin fecundații *in vitro* – prima în 1978 realizând copilul Loise Brown), prin transferul intratubar al gameților, inseminare intraperitoneală, cultură intravaginală și transfer embrionar.

15.3. PARTICULARITĂȚI FUNCȚIONALE ALE PERIOADEI DE GESTAȚIE

Relația mamă-făt. Mucoasa uterină pregătită morfologic și funcțional de către secrețiile endocrine ale gonadelor feminine și, în special, de progesteronul secretat în a doua jumătate a ciclului ovarian este capabilă să fixeze oul format prin contopirea materialului genetic al celor doi gameți. Endometrul conține celule bogate în glicogen, lipide, proteine și săruri minerale absolut necesare bunei dezvoltări a produsului de concepție, devenind deciduă.

În primele săptămâni, nutriția oului va fi asigurată de trofoblast, ca, mai apoi, placenta să preia această funcție până la sfârșitul perioadei de gestație (fig. 15.1).

După vârsta de 8–12 săptămâni, este deja prefigurată structura generală viscerală și somatică a produsului de concepție, după care urmează o dezvoltare ontogenetică rapidă.

În ultimele 6 luni de gestație, greutatea fătului crește de aproape 800 de ori, iar lungimea sa doar de 6 ori, ceea ce impune un aport nutritiv corespunzător și o placenta perfect normală.

Dezvoltarea fătului va depinde, deci, de condițiile mediului său ambiant, adică de organismul matern, care va face permanent un efort de adaptare la cerințele crescânde ale fătului (cresc frecvența cardiacă la mamă, debitul cardiac, volemia, ritmul respirator, procesele anabolice, secrețiile unor glande endocrine etc.).

Relația dintre sângele fetal și cel matern este prezentată în fig. 15.2, ilustrând circulația fetală prin cele două artere ombilicale, cât și asigurarea circulației uterine prin arterele și venele uterine.

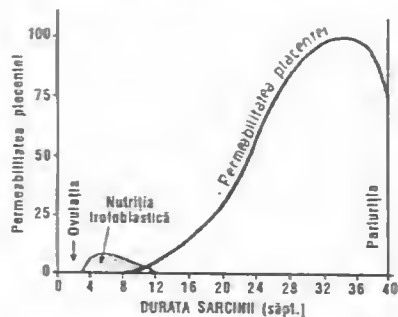


Fig. 15.1. Nutriția produsului de concepție (fazele trofoblastice și placentare).

15.3.1. ROLURILE PLACENTEI

Placenta este un organ cu deosebite proprietăți funcționale. Permeabilitatea sa permite difuzarea substanțelor nutritive din sângele matern în cel al fătului, cât și debarasarea produșilor de catabolism ai acestuia în sângele matern pentru a fi eliminați. Ca la orice membrană permeabilă, și în cazul placentei difuziunea se bazează pe

diferența de concentrație a diverselor substanțe între mediul sanguin fetal și cel matern.

Permeabilitatea placentei crește progresiv cu perioada de gestație începând cu a 8-a săptămână, pentru a atinge un maxim la a 32-a săptămână, după care suferă un proces de îmbătrânire și infarctizare, cu reducerea permeabilității. Pe măsura dezvoltării produsului de concepție are loc și o dezvoltare a suprafeței placentare, dublată de reducerea în grosime a peretelui vilozitar și creșterea permeabilității. Cu totul secundar este procesul trecerii unor celule din sângele fătului în cel al mamei și invers, fenomen întâlnit în special în cazul degradării pronunțate morfologice și funcționale a placentei din cursul gravelor tulburări de nutriție placentară.

Placenta constituie organul prin care fătul elimină CO_2 rezultat din combustibilele sale tisulare, datorită diferenței de presiune parțială ce se realizează între sângele fetal și cel matern.

Astfel, CO_2 , având o presiune parțială de aproape 48 mmHg în sângele fetal, va traversa membrana placentară spre sângele mamei, unde presiunea parțială a CO_2 este de 40–45 mmHg. În acest caz, schimbul de CO_2 între cele două medii se bazează pe aceleași criterii ca și la schimbul de gaze realizat la nivelul membranei alveolo-capilare a adultului sau al celui dintre lichidul interstițial și capilarele sanguine ale acestuia (solubilitatea CO_2 în apă, viteza de difuziune a CO_2 etc.).

Difuziunea O_2 prin membrana placentară din sângele matern în cel fetal se realizează tot pe baza diferenței de presiune parțială dintre sinusurile placentare, unde presiunea O_2 este de 50 mmHg, și sângele vilozităților ce provine de la făt, cu presiunea parțială doar de 30 mmHg, realizând un gradient de presiune mult mai mare decât în cazul CO_2 .

Placenta este considerată un fel de plămân fetal, pentru că la nivelul său au loc schimburile gazoase prin difuziune. CO_2 se transportă sub formă de bicarbonat în proporție de 62%, legat de hemoglobina fetală 30% și solvit 8%. Fătul dispune de un anumit tip de hemoglobină – hemoglobina fetală, prevăzută cu proprietatea de fixare și transport al O_2 mult mai mare decât hemoglobina adultului (fig. 15.3).

Se știe, de altfel, că hemoglobina fetală are capacitatea de a transporta O_2 într-o proporție de 20–30% mai mare decât hemoglobina maternă, pe lângă faptul că și concentrația hemoglobinei fetale este cu 50% mai mare decât cea maternă. De asemenea, hemoglobina fetală are posibilitatea să transporte mai mari cantități de O_2 la presiuni joase ale CO_2 , în special în momentul în care la nivelul placentar este cedat CO_2 sângelui matern, care va deveni mai acid comparativ cu cel fetal, care tinde spre alcalinitate.

Printr-o placenta normală, în fiecare minut pot difuza 1,2 mol O_2 pentru un gradient presional de 1 mmHg, ceea ce asigură în bune condiții oxigenarea țesuturilor fătului, alături de particularitățile funcționale ale hemoglobinei fetale deja descrise.

Tot pe bază de gradient de concentrație se realizează la nivel placentar și difuzarea din sângele mamei în sângele fătului a unor substanțe nutritive. Este cazul glucozei, care, având o concentrație de 20–30% mai mare în sângele matern decât al fătului, va difuza spre acesta. Prin același mecanism trec de la mamă la făt, prin intermediul membranei placentare, o serie de ioni, cum ar fi cei de Na^+ , K^+ , Cl^- , care, fiind utilizați permanent pentru nevoile metabolice și de edificare a produsului de concepție, se vor găsi într-o concentrație mai redusă

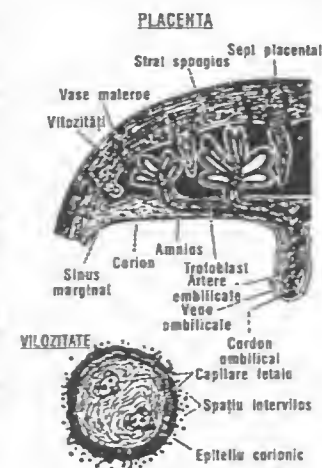


Fig. 15.2. Structura placentei; relația sanguină mamă-făt.

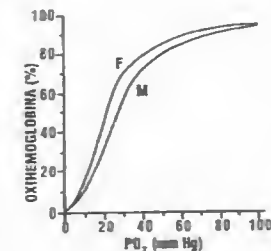


Fig. 15.3. Disocierea oxihemoglobinei fetale (F) și materne (M).

în sângele fătului decât în cel matern, favorizându-se astfel transferul prin difuziune al acestora de la mamă la făt.

Transferul de Na^+ se reduce prenatal. Acizii grași, având o mare solubilitate în structurile membranelor celulare, vor difuza ușor spre sângele fătului, pentru a asigura o parte din cheltuielile energetice ale acestuia.

Fosfolipidele și colesterolul trec sub formă de lipoproteine (LDL, HDL), după care se desfac de proteine. Fosfolipidele vor fi hidrolizate la nivel placentar, iar la nivelul ficatului fetal acestea se resintetizează din lipide.

Spre sfârșitul perioadei de gestație, când nevoile nutritive și energetice ale fătului sunt mult mai mari, se constată prezența unui transport activ al unor substanțe din sângele matern spre cel fetal, care se găsesc în concentrații mai mari la făt decât la mamă. Este cazul aminoacizilor, al acidului ascorbic, al calciului și fosforului anorganic.

Edemul sau depunerea de fibrinoid între uter și placenta, ca și infarctele placentare vor diminua transferul placentar.

Funcția secretorie a membranei placentare este datorată difuzării, la nivelul său, a unor substanțe formate în organismul fetal, cum este cazul ureei, al acidului uric și creatininei. Datorită difuzibilității mari prin membrana placentară, ureea în sângele fetal se află într-o concentrație puțin mai mare decât în cel matern, spre deosebire de creatinina, care, nedifuzând ușor, asigură un mare gradient între sângele fetal și cel matern.

Placenta îndeplinește și un veritabil rol de rezervor pentru unele substanțe absolut necesare creșterii și dezvoltării fetale. Proteinele și ioni, ca cei de Fe și Ca , vor fi stocați în placenta, de unde vor fi livrați spre circulația fetală către sfârșitul perioadei gestative. În același timp, placenta stochează glucoza sub formă de glicogen și este capabilă să redea glucoza necesară în circulația fetală, îndeplinind rolul de veritabil ficat adult. Pe măsura maturării produsului de concepție și a dezvoltării morfologice și funcționale a țesutului hepatic, capacitatea metabolică a placentei este tot mai puțin evidentă. În acest fel, placenta are un rol deosebit de important pentru asigurarea aportului nutritiv și de eliminare a produșilor toxici din organismul fetal, în special în prima etapă, când funcțiile ficatului, intestinului, plămânului și rinichilor sunt aproape inexistente.

În toată perioada sarcinii, placenta se va comporta ca un filtru pasiv, ca o membrană dializabilă între sângele matern și cel fetal.

Datorită rolului său în depozitarea vitaminelor, a substanțelor energetice, a apei și a sărurilor minerale, placenta poate asigura o perioadă de timp necesitățile organismului fetal, chiar dacă mama primește o cantitate necorespunzătoare din aceste substanțe.

În afara acestor funcții, placenta este considerată și un veritabil orgaan endocrin, fiind capabilă să sintetizeze o serie de hormoni, printre care estrogeni, gonadotrofine corionice, progesteron și hormon lactogen.

Gonadotrofinele corionice (glicoproteine cu Mr 36 000) sunt secretate de către celulele sincitiale trofoblastice în fluidele materne. După a 8-a săptămână de la ovulație se constată un maxim secretor al acestor hormoni și o reducere a secreției după aproximativ 16–20 de săptămâni de la ovulație (fig. 15.4).

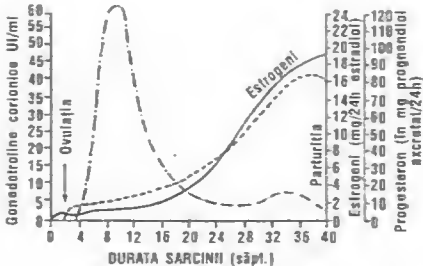


Fig. 15.4. Secreția progesteronului, estrogenilor și a gonadotrofinelor corionice la diferite vârste de sarcină.

Gonadotrofinele corionice au o structură chimică asemănătoare hormonului luteoizant secretat de adenohipofiză, având principalul rol de a bloca involuția corpului galben, favorizând secreția în continuare a progesteronului și estrogenilor de către acesta. Hormonii amintiți secretați în exces vor determina dezvoltarea corespunzătoare a endometriului și încălzirea celulelor sale cu substanțe nutritive absolut necesare nidării și dezvoltării oului. Insuficiența funcțională a corpului galben poate provoca avortul spontan.

Gonadotrofinele corionice influențează la fătul mascul secretia de testosteron de la nivelul celulelor interstițiale testiculare, care va produce atât creșterea organelor sexuale masculine, cât și coborârea testicnelor în scrot în ultima perioadă a gestației.

Estrogenii secretați de aceleași celule sincitiale ale trofoblastului, în special în perioada finală a gestației (mai mult de 300 de ori decât în ciclul ovarian normal), sunt reprezentați în special de estriol care, în ovarul femeii oegravide, se sintetizează în cantități neglijabile.

Estrogenii placentari reprezentați nu numai de estriol, ci și de estradiol și estroadiol, nu se sintetizează *de novo*, ci din dehidroepiandrosteron, ca principal compus steroid format în corticosuprarenala fătului, care va suferi o hidroxilare în ficatul fetal, după care ajunge la nivelul placentei. O parte a acestui compus nu se hidroxilează și va trece în androstendion și testosteron, din care se va putea sintetiza o nouă cantitate de estronă, respectiv estradiol.

Din precursorul matern se sintetizează doar 10% din estrogenii placentari. Acești hormoni vor influența atât dezvoltarea țesutului glandular al uterului, cât și creșterea organelor sexuale ale fătului femel.

În același timp, sub influența estrogenilor placentari, simfiza pubiană și articulația sacro-iliacă ale mamei devin mai elastice, iar ligamentele pelvine se relaxează în vederea expulziei fătului. Estrogenii placentari cresc nivelul lipidelor plasmatiche și al colesterolului la gravidă, cresc, de asemenea, activitatea sistemului renin-angiotensină, cât și coagulabilitatea sângelui.

Urina gravidei la termen conține 33 mg/zi estrogeni, comparativ cu 0,1 mg/zi la femeia negravidă. Plasma gravidei conține 150 ng/ml estrogeni, în timp ce, în perioada ovulației, concentrația plasmatică estrogenică este doar de 0,06 ng/ml.

De altfel, dozarea estrogenilor materni ne dă indicații asupra funcționalității complexului materno-placentar.

Progesteronul este un alt hormon secretat de placenta, alături de cel ce provine din secreția corpului galben. Rolul său este deosebit de important în segmentarea oului, în stimularea secrețiilor tubare și uterine în vederea favorizării nidării oului.

Progesteronul stimulează dezvoltarea deciduei, de care va depinde nutriția embrionului, și, în același timp, va inhiba contracțiile uterului gravid în vederea menținerii sarcinii. Placenta secretă în special progesteron și mai puțin 17-hidroxiprogesteron, secretat în special de către corpul galben.

La termen, placenta secretă aproximativ 250 mg progesteron/zi (în cordonul ombilical). În plasma maternă, progesteronul are o concentrație de 11–32 mg/100 ml, iar la negravidă de 0,1–2 mg/100 ml, ce se va elimina prin rină la gravidă sub formă de pregnandiol, în concentrație de 10 mg/24 h la sfârșitul primului trimestru și de 45 mg/24 h la 36 săptămâni de gestație.

Progesteronul placental trece în circulația fetală și în cea maternă, iar secreția sa continuă atât în placenta, cât și la nivelul corpului galben, chiar dacă fătul este mort. Secreția progesteronică prezintă pe parcursul gestației va constitui element de stimulare și a secreției lactate, alături de hormonul placentar lactogen (somatomamotropina), pus recent în evidență (Mr – 38 000). Acest hormon are acțiune similară hormonului de creștere (STH), influențând atât dezvoltarea fetală și mamară, cât și metabolismul glucidic, având ușor efect diabetogen.

La nivelul placentei s-au mai pus în evidență o serie de secreții hormonale:

- tiotropina placentară, cu MR de 30 000, care explică dezvoltarea în volum a tiroidei pe parcursul sarcinii;
- proopiomelanocortinul, precursor pentru β -lipoproteină și ACTH la nivelul adenohipofizei, iar în lobul intermediar hipofizar precursor pentru MSH, gamma-lipoproteină și β -endorfină. Acest peptid a fost evidențiat în extractul de placenta sau în culturi de țesut placentar, alături de o altă serie de peptide hipotalamice cu rol de stimulatori adenohipofizari (gonadoliberine, somatoliberine, CRH, TRH etc.);
- receptori pentru factori de creștere polipeptidici (EGF, IGF, VIP, SRA etc.);
- factori eicosanoizi (PGE, PGF etc.).

15.3.2. LICHIDUL AMNIOTIC

În mod normal, lichidul amniotic are un volum de 500–1 000 ml, iar studii recente cu izotopi radioactivi au evidențiat înlocuirea totală a apei din acest mediu la 3 ore și a electroliților la 15 ore (Na^+ , K^+).

Lichidul amniotic poate fi considerat ca o expansiune a lichidului extracelular al fătului, în special pentru primele luni de sarcină, datorită compoziției sale asigurate prin mecanismul de ultrafiltrare al plasmiei. Acest lichid are un important rol trofic datorită conținutului său în substanțe minerale și în proteine, alături de rolul antimicrobian și bacteriostatic asupra bacilului coli, Klebsielliei, stafilococului auriu, Candidiei etc. Totodată, lichidul amniotic protejează produsul de concepție de lovitură, striviri, iar conținutul său în catecolamine și prostaglandine participă la declanșarea nașterii.

15.3.3. RĂSPUNSUL ORGANISMULUI MATERN ÎN PERIOADA GESTAȚIEI

Modificări importante ale funcției organismului femeii gravide asigură menținerea și dezvoltarea produsului de concepție în cavitatea uterină.

Secrețiile placentare vor influența în mare măsură restul glandelor endocrine ale mamei, determinând o creștere în dimensiuni cu aproximativ 50% a adenohipofizei în timpul sarcinii și o intensificare a producției de STH, TSH, ACTH.

În același timp este inhibată secreția de FSH și LH, ca urmare a reacției de tip *feed-back* între aceștia și secreția progesteronică și estrogenică placentară. Glucocorticoizii prezintă o secreție moderat crescută în organismul femeii gravide, mobilizând aminoacizii din țesuturile acesteia, în vederea utilizării lor în sintezele tisulare ale fătului. Spre sfârșitul perioadei de gestație, aldosteronul se secretă în cantități de 2–3 ori mai mari, care, alături de estrogeni, vor reține mai mult Na^+ la nivelul tubilor renali și secundar apa, cu tendință la edem.

Secreția în exces a TSH la femeia gravidă va duce la stimularea sintezei de tiroxină. Glanda tiroidă crește în volum cu aproximativ 50% față de perioada de negravidă.

S-a constatat, de asemenea, și o creștere în volum a glandelor paratiroidale, cu stimularea secreției de parathormon (PTH), în special la gravidele care nu primesc suficient Ca^{2+} prin alimentație. Secreția în exces a PTH va reabsorbi mai intens Ca^{2+} din țesutul osos al mamei, va crește reabsorbția renală și intestinală a acestui ion, cu scopul menținerii unui nivel crescut al calcemiei, necesar transferului de calciu la făt în vederea edificării scheletului. Secreția de PTH se va menține crescută și în perioada de lactație. Atât placenta, cât și corpul galben constituie locul de sinteză a unui alt factor hormonal – *relaxin* (polipeptid cu Mr de 9 000), implicat atât în relaxarea ligamentelor pelvine și a simfizei pubiene în timpul nașterii, cât și în relaxarea colului uterin din aceeași perioadă. Se discută, de asemenea, rolul său alături de progesteron în inhibarea motilității uterului gravid.

În domeniul sistemului cardio-vascular se constată o reducere a rezistenței periferice și o creștere a întoarcerii venoase spre inimă, având drept urmare o înmulțire a șunturilor arterio-venoase și o creștere a debitului cardiac cu peste 30–40% față de normal, în special la a 27-a săptămână de gestație, după care, în ultimele 8 săptămâni, ajunge din nou la valorile perioadei de negravidă.

Sub influența estrogenilor și a aldosteronului secretat în exces cresc volumul fluidelor extracelulare și, implicit, volumul sanguin cu peste 35% în a doua parte a sarcinii, ceea ce explică reducerea hematocritului prin hemodiluție. Spre sfârșitul sarcinii, măduva osoasă devine mai activă pentru eritropoieză și concentrația sângelui atinge valorile normale.

În ultima perioadă a sarcinii, organismul matern are în circulația generală un plus de 1–2 litri de sânge, din care va pierde 1/4 în momentul nașterii.

Respirația organismului femeii gravide se intensifică pe toată perioada gestației, în special în ultimul trimestru, datorită creșterii metabolismului bazal și, deci, a consumului de O_2 , cu formare în exces de CO_2 . Oxigenul utilizat de gravidă în ultimele săptămâni de gestație crește cu peste 20% față de normal, ceea ce va determina creșterea debitului ventilator datorită sensibilității mai mari a centrilor nervoși respiratori față de CO_2 , realizată de progesteron. Ca urmare, debitul ventilator poate crește cu 40–50% față de normal în ultima săptămână de gestație, în timp ce presiunea parțială a CO_2 arterial va fi mai scăzută.

Pentru a fi asigurată o ventilație corespunzătoare, va crește frecvența respiratorie, deoarece volumul curent va scădea prin expansiunile tot mai reduse ale diafragmului, pe măsura dezvoltării uterului.

Datorită acumulării crescute a produșilor de catabolism atât ai organismului matern suprasolicitat metabolic în perioada gestației, cât și ai celor proveniți de la făt, rinichiul mamei își va intensifica activitatea.

Va crește, astfel, reabsorbția tubulară de Na^+ , Cl^- și apă sub influența hormonilor steroizi secretați în exces atât de corticosuprarenală, cât și de placenta. Filtrarea glomerulară este, de asemenea, stimulată, cu scopul eliminării compensatorii a apei și electroliților.

Datorită efectului relaxant pentru fibrele musculaturii ureterale a progesteronului și a relaxinului, la femeia gravidă se întâlnește o dilatare moderată și a ureterelor, la care participă și compresiunea lor de către uterul gravid, care împiedică pasajul corect al urinei de la rinichi spre vezica urinară. În asemenea cazuri se pot asocia infecții rebele datorită stazei ureterale.

În ultima parte a perioadei de gestație, metabolismul bazal crește cu 15–20% prin intervenția hormonilor tiroidieni, corticosuprarenali și sexuali secretați în cantitate mai mare decât la femeia negravidă.

Acoperirea nevoilor energetice din aceeași perioadă se realizează pe seama unui aport alimentar crescut, produs de un apetit mai pronunțat.

În perioada edificării noului organism cresc nevoile în proteine, glucide, lipide, în vitamine și săruri minerale, care, dacă nu se aduc în cantități suficiente fătului, pot realiza deficiențe în dezvoltarea somatică și nervoasă. Datorită unui aport suficient de material energetic și nutritiv, în ultimele două luni de sarcină fătul își dublează greutatea.

Pentru formarea sângelui, fătul are nevoie în medie de 375 mg Fe, iar organismul mamei necesită în plus încă 600 mg Fe pentru formarea cantității de sânge suplimentar (1–2 l).

Dieta săracă în fier poate produce atât anemia mamei, cât și a fătului. O parte din aceste substanțe organice și anorganice sunt stocate pe parcursul sarcinii la nivelul placentei, de unde se vor elibera în circulația fătului în ultima perioadă a sarcinii, când nevoile metabolice ale acestuia sunt atât de mari. Prezența vitaminei K în cantitate suficientă la mamă este absolut obligatorie pentru sinteza la făt a protrombinei, cu scopul prevenirii hemoragiilor cerebrale din timpul nașterii.

Ca urmare a unei alimentații corespunzătoare și a secrețiilor endocrine amplificate, greutatea corporală a femeii gravide crește cu peste 10 kg, în special în ultimul trimestru de sarcină. Din acest surplus ponderal, peste 3 kg se datorează fătului și 1,8 kg lichidului amniotic, placentei și membranelor fetale. Sunt situații rare, când surplusul ponderal al gravidei poate depăși 30 kg printr-un depozit anormal de grăsime la nivel subcutanat.

15.4. PARTICULARITĂȚI FUNCȚIONALE ALE PERIOADEI FETALE ȘI NEONATALE

După nădare, oul continuă să se dezvolte pe parcursul celor 40 de săptămâni de gestație, fiindu-i asigurate toate condițiile de către noul organ format în uterul matern – placenta. Pe măsura progresării

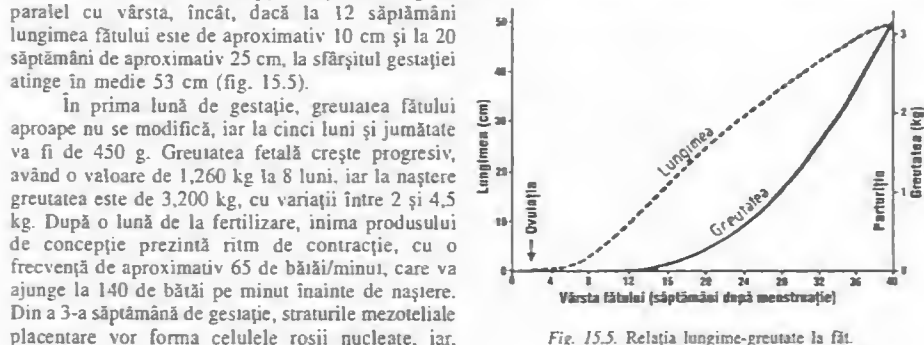


Fig. 15.5. Relația lungime-greutate la făt.

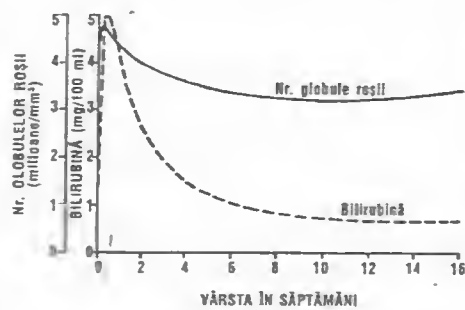


Fig. 15.6. Valoarea bilirubinemică și a globulelor roșii la făt.

La nou-născut, numărul globulelor roșii este de 5,7 milioane/mm³ datorită unui grad de hipoxie din timpul perioadei fetale, constatându-se apoi o reducere până la 3,25 milioane/mm³ în săptămânile a 8-a – a 10-a postnatal, cu o revenire la valorile inițiale abia după 2–3 luni de viață extrauterină.

Globulele albe ale nou-născutului sunt în număr de aproximativ 25 000/mm³, mai multe de cinci ori față de valorile adultului normal.

În primele trei zile după naștere, concentrația bilirubinei plasmatice este de 5 mg/100 ml, în loc de 1 mg/100 ml – valoare care se reduce progresiv pe măsură ce ficatul nou-născutului va fi capabil să conjuge acest pigment cu acidul glucuronic pentru a-l elimina prin bilă (fig. 15.6).

Hiperbilirubinemia nou-născutului este fiziologică și se manifestă prin colorația în galben a tegumentelor și, în special, a sclerelor acestuia. În incompatibilitatea de Rh, când tatăl este Rh pozitiv, deci și fătul, iar mama Rh negativă, anticorpii anti-Rh de origine maternă vor hemoliza intens globulele roșii ale fătului și non-născutului, cu formarea unei prea mari cantități de bilirubină și hipercolorația tegumentelor nou-născutului. De asemenea, în aceleași condiții, în circulația periferică a nou-născutului nu mai apar hematii adulte, acestea rămânând în stadiul de eritroblast (eritroblastoza nou-născutului), nu vor putea asigura transportul gazelor în condiții fiziologice. La nou-născut se constată, de asemenea, o reducere în plasmă a factorului VIII și a protrombinei, deoarece, prin lipsa unei flore microbiene adecvate din colon, nu se sintetizează suficientă vitamina K, apărând tendința la hemoragii a nou-născutului.

Imediat după naștere se impun unele ajustări ale circulației sângelui pentru a asigura hematoza la nivelul plămânului sau fluxul sanguin necesar funcțiilor ficatului.

Circulația fetală are particularitățile ei total deosebite față de adult, pentru că în perioada intrauterină plămânul nu este practic în funcțiune, iar ficatul are funcții metabolice reduse. Placenta, în schimb, este foarte bine irigată, ceea ce obligă cordul fetal să trimită la acest nivel o cantitate suficientă de sânge.

Sângele care se întoarce de la placenta se varsă în ductul venos și în cantitate mică ajunge și la ficat (fig. 15.7).

Ajuns în atriu drept prin vena cavă inferioară, sângele va trece direct și în cel stâng, prin foramen ovale. După oxigenare, sângele venit de la placenta ajunge în compartimentele stângi ale inimii și din ventriculul stâng ajunge în vasele capului și ale membrilor inferioare.

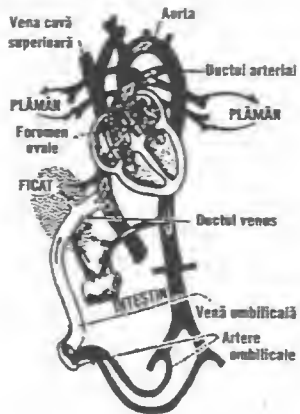


Fig. 15.7. Circulația fetală.

Sângele ce provine din extremitatea cefalică a fătului ajunge prin vena cavă superioară în atriu drept și, de aici, în ventriculul drept, care-l va trimite prin artera pulmonară, de unde va ajunge în aorta descendentă, prin canalul arterial, iar apoi la placenta, prin cele două artere ombilicale, pentru oxigenare.

Din întreaga cantitate de sânge a fătului, doar 55% trec prin placenta, iar restul, de 45%, trece prin zona periferică a organismului fetal.

Plămânii primesc doar 12% din întreaga masă de sânge în timpul perioadei fetale, iar după naștere acest procent crește de 3–4 ori.

La naștere scade foarte mult fluxul de sânge al placentei, motiv pentru care se constată o presiune mult crescută în aortă, în ventriculul și atriu stâng. În același timp se constată o dublare a valorii rezistenței vasculare periferice.

Ca rezultat al distensiei pulmonare, după naștere scade rezistența vasculară pulmonară. În timpul vieții fetale, condițiile de hipercapnie și hipoxie create în plămân vor duce la o vasoconstricție pronunțată a vaselor pulmonare, iar, după naștere, când prin ventilație pulmonară se elimină CO₂ și crește aportul de O₂, apare o evidentă vasodilatație, cu reducerea presiunii în artera pulmonară, în ventriculul drept și atriu drept.

Din cele relatate, reținem faptul că presiunea sângelui în atriu drept este redusă, spre deosebire de cea din atriu stâng, unde este crescută, obligând sângele din atriu stâng să treacă spre cel drept prin foramen ovale. Membrana acestui orificiu va fi însă alipită septului interatrial și comunicarea dintre atri se va închide. Într-un procentaj mic, acest orificiu interatrial poate să rămână neînchis toată viața, cu repercusiuni circulatorii. Același fenomen al diferenței de presiune sanguină dintre aortă și artera pulmonară (presiune mare în aortă, mică în pulmonară) va duce la închiderea și a canalului arterial. În primele cinci ore după naștere, când canalul este permeabil, sângele va curge dinspre aortă spre pulmonară exact invers ca în viața fetală. Ca urmare a acestui fapt, se constată o constricție puternică a fibrelor musculare din peretele canalului arterial și, în cel mult 1–8 zile, este blocat fluxul sanguin dinspre aortă spre pulmonară, iar, după 1–2 luni, acest canal se fibrozează.

Este vorba, deci, mai întâi de o închidere funcțională a canalului arterial și apoi de una anatomică, impusă de necesitățile funcționale ale nou-născutului.

Dacă în perioada de fat presiunea parțială a O₂ sângelui din canalul arterial este doar de 15 mmHg, aceasta va crește până la 100 mmHg după 5–6 ore postnatal, ceea ce explică într-o oarecare măsură și tendința la constricție a fibrelor musculare netede din canalul arterial. Persistența canalului arterial va crea mari dereglări funcționale în circulația sanguină a nou-născutului și, de aceea, se impune închiderea sa chirurgicală.

Sângele venei ombilicale se varsă direct în vena cavă inferioară, ajungând într-o mică cantitate și la ficat. La 1–3 ore după naștere, peretele muscular al ductului venos se contractă puternic, nemaipermițând trecerea sângelui la nivelul său. Ca urmare, va crește presiunea venei porte de la 0 mmHg la 6–10 mmHg și se va permite intrarea sângelui în sinusurile lobulilor hepatici, cu asigurarea unei circulații funcționale a ficatului.

Volumul sanguin al nou-născutului are o valoare de 300 ml imediat după naștere, la care se adaugă 75 ml provenienți din cordonul ombilical și aproximativ încă 250–300 ml de proveniență extravasculară. Debitul cardiac al nou-născutului este de aproximativ 550 ml/minut, fiind de 2 ori mai mare ca la adult, comparativ cu masa corporală. Sunt situații în care pierderile masive de sânge la nivel placentar, din timpul nașterii sau prenatal, să reducă evident debitul cardiac la nou-născut.

În prima zi de viață extrauterină, presiunea arterială a nou-născutului are o valoare medie de 70 mmHg/50 mmHg, iar în următoarele luni aceste valori vor fi de 90 mmHg/60 mmHg, crescând progresiv an de an și atingând valorile adultului doar în perioada adolescenței.

Rinichiul fetal are un rol secundar în timpul vieții intrauterine comparativ cu cel al mamei sau al placentei, care mențin echilibrul hidroelectrolitic al fătului pe tot parcursul gestației. După naștere, rinichiul nou-născutului va dobândi performanțe fiziologice din ce în ce mai mari, având un rol predominant în homeostazia organismului, totuși neatingând valorile de la adult.

Prezența la nou-născut a unei concentrații mai crescute în plasmă a unor hormoni reglează fluxul sanguin renal și debitul filtrării glomerulare, cum este cazul prostaglandinelor. Din punct de vedere funcțional, rinichiul nou-născutului se deosebește de cel al copilului mare sau al adultului. La naștere,

rinichii reprezintă un procentaj mare din greutatea corpului. Față de adult, diametrul glomerulilor este de două ori mai redus, iar membrana bazală a capilarelor mai subțire. La naștere sunt deja formați apnepe toți nefronii. Concentrația urinei în primele 2-3 zile după naștere este de 600 mOsm/l, iar după 14 zile de 1 400 mOsm/l.

Debitul urinar diferă de la primele zile postnatal către sfârșitul primei luni de viață extrauterină. În primele 48 de ore, nou-născutul poate să nu formeze urină, după cum în prima zi poate urina 15-20 ml, pentru ca, în a 12-a zi, volumul urinar să atingă deja 227 ml. Debitul filtrării glomerulare are o valoare de 0,4-4,8 ml/minut în primele 5 ore după naștere, de 17,9 ml/min după 2-3 zile și de 30 ml/min pentru restul perioadei neonatale.

Dacă se infuzează nou-născutului soluție de glucoză 5% în primele cinci ore după naștere, se constată o creștere a debitului urinar – fenomen observat și la prematuri. Bineînțeles că și la nou-născut debitul urinar va depinde de hormonii vasoconstrictori formați în organismul său, cât și de cei ajunși pe cale placentară de la mamă, după cum și valoarea presiunii sângelui ce irigă glomerulii renali are o deosebită importanță.

Față de adult, urina nou-născutului este mai diluată, având concentrația de cel mult 700 mOsm/l în primele zile, pentru că proteinele plasmatice se află în procentaj redus, iar formarea ADH este total insuficientă. Sodiu este eliminat prin urina nou-născutului, deoarece în această perioadă activitatea sistemului renin-angiotensin-aldosteron este mult scăzută, iar reabsorbția sodică tubulară încă insuficientă, după cum se constată și o limitare a activității pompei Na^+ , K^+ -ATPază.

Acest fapt explică de ce în urina tubului distal a nou-născutului și a copilului mic crește concentrația Na^+ , K^+ și Cl^- , necesitând administrarea unei cantități zilnice de 2-4 mEq Na^+ , K^+ , Cl^- /kg.

Valoarea calciului total și ionizat din serul nou-născutului la termen este mai mare ca la adult, scade în primele 4 zile postnatal și apoi atinge valurile adultului, în timp ce concentrația serică a magneziului este identică cu cea de la adult.

Nivelul seric al fosfaților este de 6,55 mg/l în primele 24 de ore, de 8 mg/l în primele două săptămâni și de 5,75 mg/l la o lună, valori identice cu cele de la prematuri.

Hormonul paratirodian este pus în evidență în plasma nou-născutului după 48 de ore de la naștere, deși în sângele cordonului ombilical acest hormon nu apare.

Calcitonina este erescută în plasma nou-născutului, în special la copiii prematuri.

Fosfataza alcalină serică are valoarea de 35-105 U/l la naștere și de 70-250 U/l după prima lună, în timp ce producția de metabolism al vitaminei D_3 [25 OHD $_3$ și 1,25 (OH) $_2\text{D}_3$] au valorile adultului.

Acidifierea urinei este evidentă după primele două săptămâni de viață extrauterină a nou-născutului la termen și după 4 săptămâni la cei imaturi, denotând funcția excretorie a tubilor renali pentru ioni de hidrogen. Reabsorbția bicarbonaților se realizează ca la adult, începând cu prima săptămână de viață extrauterină.

Pentru echilibrul acido-bazic trebuie menționată presiunea parțială a CO_2 în sângele nou-născutului la termen ca fiind de 33,5 mmHg după 2-3 săptămâni de la naștere, comparativ cu a adultului, care este de 39 mmHg, în timp ce concentrația totală a CO_2 este de 21,21 mmol/l la nou-născut și de 25 mmol/l la adult.

Copiii nou-născuți pierd multă apă prin evaporare, cu atât mai multă, cu cât copilul este plasat în condiții de mediu cu temperatură ridicată și fără umiditate. Pierderile urinare și fecale de apă sunt de aproximativ 80 ml/kg/zi după zilele a 5-a, a 7-a. Eliminarea prin urină a unei cantități mari de ioni, cât și reabsorbția insuficientă a apei alături de pierderea acesteia și pe cale cutanată expun nou-născutul la virarea pH-ului spre acidoză și deshidratare. De altfel, metabolismul nou-născutului este de aproximativ două ori mai mare decât al adultului, în funcție de greutatea corporală, având o tendință la acidoză datorită imperfecțiunii sistemelor biologice și chimice de tamponare a excesului acid rezultat din oxidațiile celulare.

Rinichiul – principalul organ implicat în eliminarea ionilor de hidrogen din organism, este încă imperfect la naștere și abia la sfârșitul primei luni de viață extrauterină își capătă unele performanțe funcționale. De aceea osmolaritatea urinei nou-născutului este atât de mică, lipsind capacitatea de concentrare a tubilor uriniferi. Față de osmolaritatea plasmiei, urina nou-născutului este concentrată doar de 1,5 ori față de 4 ori la adult.

La naștere, organismul conține apă într-un procentaj de peste 70%, comparativ cu adultul, la care apa reprezintă doar 58% din greutatea corporală (fig. 15.8).

Față de adult, la care predomină apa în spațiul intracelular, la nou-născut este evident sectorul extracelular și, pe măsura creșterii celulelor, raportul se inversează.

Sodiu total și clorurile sunt mai crescute la nou-născut ca la adult, comparativ cu greutatea corporală, dar potasiul, magneziul și fosfații sunt mai reduși.

Respirația în timpul vieții fetale practic nu se manifestă, deși către sfârșitul lunii a treia de gestație mișcările respiratorii se pun în evidență, fiind determinate fie de unii stimuli tactili, fie de asfixie. Aceste mișcări respiratorii sunt totuși inhibitate de prezența la nivelul alveolelor a unei anumite secreții, cât și de compoziția chimică a plasmiei, care nu constituie încă un factor stimulator pentru centrul bulbar. În acest mod se evită pătrunderea la nivelul plămânului fetal a unei cantități de lichid amniotic și meconiu rezultat din secrețiile gastro-intestinale ale acestuia.

După ligaturarea cordonului ombilical, placenta nu mai asigură oxigenarea nou-născutului și eliminarea CO_2 rezultat în organismul acestuia din metabolismul tisular. Ca urmare, în sângele nou-născutului se acumulează CO_2 , care va constitui factor de stimulare a centrului inspirator bulbar, cu declanșarea primei respirații. La acest fapt mai contribuie excitațiile transmise centrului bulbar și de la exteroceptorii cutanați, prin manevrarea nou-născutului de către personalul medical, cât și de temperatura mediului ambiant, care este inferioară celei intrauterine.

Dacă prima respirație nu apare, hipoxia și hipercapnia care devin tot mai pronunțate vor constitui stimuli suplimentari pentru centrul respirator, ducând la apariția primului inspir. Sunt situații în care este deprimat centrul respirator bulbar al nou-născutului de către o doză prea mare de anestezic administrată gravidei în momentul nașterii, ceea ce întârzie apariția mișcărilor respiratorii, ca și în cazul prelungirii timpului de expulzie fetală, când se instalează un grad pronunțat de hipoxie. Diverse grade de hemoragii cerebrale posttraumatice obstetricale pot afecta, de asemenea, funcția centrilor respiratori din bulb.

Rezistența la hipoxie este mult mai mare la nou-născut decât la adult. Insuficiența respiratorie produsă de blocarea respirației timp de 4-5 minute la adult poate produce moarte, în timp ce nou-născutul rezistă la hipoxie 15 minute.

După naștere, dacă timp de 10 minute nu s-a inițiat respirația, pot apărea modificări funcționale la nivelul diverselor regiuni cerebrale (talamus, coliculi evadrigemeni inferiori, nucleii motori corticali și medulari), cu repercusiuni funcționale grave pentru viața non-născutului.

La naștere, alveolele pulmonare sunt lipite datorită prezenței la nivelul lor a unui strat de lipide, eu o tensiune mare superficială, încât, pentru a deschide alveolele pulmonare, este necesar să acționeze o presiune negativă de aproximativ 25 mmHg.

Surfactantul secretat din lunile 1 – a 3-a de gestație, de către anumite celule ale epitelului alveolar, are proprietatea să reducă tensiunea superficială a lichidului alveolar și să permită deschiderea alveolelor. De altfel, pe tot parcursul vieții, surfactantul menține alveolele uscate și deschise, iar insuficiența secreției a acestei lipoproteine produce colapsul pulmonar și imposibilitatea expansiunii plămânului.

Surfactantul – în strat monomolecular – se găsește interpus între aerul alveolar și stratul de lichid din alveole, realizând o tensiune superficială eu o valoare mult mai mică decât dacă ar exista în contact aer-apă. La imaturi, secreția surfactantului este mult redusă, ceea ce explică decesul frecvent al acestora, imediat după naștere, prin insuficiență respiratorie.

Prima respirație realizează în spațiul intrapleură o presiune negativă de 50 mmHg, ea urmare a unui travaliu efectuat de musculatura inspiratorie. Plămânii nu se destind decât la o presiune negativă de 39 mmHg, iar, la -50 mmHg, în plămân intră aproximativ 40 ml aer.

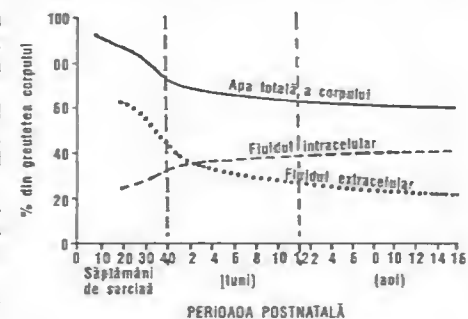


Fig. 15.8. Valoarea lichidelor intra- și extracelulare, comparativ cu apei totale la făt și postnatal.

În expir se realizează o presiune pozitivă, probabil dată de rezistența vâscoasă a lichidului bronșial. În următoarele 40 de minute după naștere, respirațiile se normalizează, având o frecvență de 38–40/min și un volum curent de 15–16 ml. În acest fel se realizează un debit ventilator de 640 ml/min, mai mare de două ori, în funcție de greutatea corporală, decât la adult, în timp ce capacitatea funcțională reziduală a nou-născutului are o valoare doar la jumătate față de a adultului.

Datorită lumenului redus al căilor respiratorii, rezistența la flux este mare la nou-născut, iar complianța pulmonară – care exprimă raportul dintre volum și presiunea pulmonară – este scăzută (la adult, complianța are valoarea de 0,13 l pentru presiunea de 1 cm apă); când presiunea alveolară crește cu 1 cm apă, plămânii vor primi 130 ml aer.

Tractul gastro-intestinal prezintă, de asemenea, unele particularități la făt și nou-născut față de copilul mare sau adult. Încă din a 9-a săptămână de gestație, sunt puse în evidență vilozitățile intestinale, mai întâi dispartate, iar după a 14-a săptămână se găsesc pe tot intestinul subțire. Din a 10-a, a 12-a săptămână sunt evidențiate și criptele lui Lieberkühn. Microvilii de pe enterocite apar după a 8-a, a 10-a săptămână, denotând potența absorbantă a acestora. În aceeași perioadă, în colon apar plexurile Meissner și Auerbach, iar, după 6 luni, distribuția normală a celulelor ganglionare este o realitate. Către sfârșitul gestației, fătul va ingera aproximativ 500 ml pe zi de lichid amniotic, ceea ce probabil are rol stimulant asupra dezvoltării activității enzimelor digestive.

Fenmenele motorii digestive au fost mai puțin studiate atât la făt, cât și la nou-născut. Se știe că deglutiția se manifestă din a 16-a, a 17-a săptămână, și că fătul ingurgitează 2–7 ml de lichid amniotic în 24 de ore începând de la această vârstă, cantitate care va crește progresiv, pe măsura dezvoltării sarcinii, ajungând la 500 ml pe zi imediat înaintea nașterii.

În lichidul amniotic, fătul elimină și meconium rezultat din secrețiile proprii ale celulelor tractului digestiv, cât și din resturile neabsorbite ale lichidului amniotic ingerat. Hipoxia intensifică procesul de formare a meconiului.

La prematuri, reflexul deglutiției este mai puțin evident și, de aceea, pentru nutriția lor se utilizează gavage. Abia după a 34-a săptămână de gestație suptul și deglutiția sunt perfectate, iar, în cazul unei necondanțe între aceste două acte motrice, asociată cu apnee, poate apărea refluxul gastro-esofagian, cu inundarea căilor respiratorii și asfixie.

Din a 12-a – a 14-a săptămână, se pune în evidență activitatea dizaharidazelor, care se perfectează progresiv spre a 24-a săptămână de gestație. După 30 de săptămâni s-a constatat și activitatea lactazei, care devine tot mai evidentă postnatal; nou-născuții care nu conțin această enzimă în sucurile digestive prezintă intoleranță la lactoză.

După a 16-a săptămână în lichidul amniotic s-a pus în evidență și amilaza pancreatică, deși activitatea acestei enzime crește după a 22-a săptămână de viață intrauterină. Amilaza pancreatică nu este prea activă nici după naștere, motiv pentru care nou-născutul nu poate absorbi decât dizaharidele pe care le ingeră ca atare sau ca monozaharide.

Fenmenul de absorbție la nivelul intestinului fetal și al nou-născutului se manifestă, de asemenea, diferențiat față de adult, ținând cont de prezența unor imaturități funcționale.

Asfel, glucoza se absoarbe într-un procentaj mic. După vârsta de 1 an, transportul maxim de glucoză la nivelul intestinului subțire este de 5,8 mmol, în timp ce la adult are valoarea de 20 mmol sau chiar mai mult. La imaturi se constată o malabsorbție a hidrocarbonatelor, explicând deficitul de substrat energetic al acestora. Absorbția proteinelor se realizează la făt probabil fără ca acestea să fie degradate, prin procesul de pinocitoză, iar aminoacizii sunt transportați ca atare – probabil prin procese active, ca și la adult. Nou-născutul este capabil să-și sintetizeze proteine, astfel încât, cu o dietă adecvată, mai mult de 90% din aminoacizii ingerați vor fi utilizați pentru edificarea proteinelor proprii.

Peptidazele pancreatice și intestinale sunt adecvate pentru digestia nou-născutului, având o activitate mult mai slabă la imaturi.

Începând din a 12-a săptămână de gestație, lipidele sunt absorbite prin mucoasa intestinală a fătului, punându-se în evidență lipaza din a 16-a, a 18-a săptămână, cu o activitate maximă după săptămâna a 28-a. După naștere, activitatea lipazică crește progresiv până în jurul vârstei de 9 luni, permițând o bună degradare a lipidelor ingerate de către nou-născut și o bună absorbție. Se cunosc mai puține date despre lipaza linguală formată în zona bazei limbii, care ajută în mare măsură la digestia grăsimilor de către nou-născut.

La prematur, absorbția lipidelor în intestin este redusă, pentru că la aceștia și sinteza sărurilor biliare este scăzută. Sărurile biliare la nou-născut se găsesc în cantitate suficientă pentru a favoriza absorbția grăsimilor în prealabil emulsionate. Steroidii și fenobarbitalul administrat în cantități mari la gravidă vor crește concentrația sărurilor biliare la copil.

Funcțiile ficatului sunt încă imperfecte la nou-născut. Incapacitatea metabolică a ficatului este relevată de o hipoproteinemie (1 g/dl) și hipoglicemie (30–40 mg/dl) evidentă. Sinteza de glicogen în ficat se pune în evidență începând cu a 9-a săptămână de gestație, iar funcția glicogenopexică a ficatului apare spre a 40-a săptămână. După naștere se eliberează 90% din glicogenul hepatic al nou-născutului, pentru a face față nevoilor energetice în lipsa glucozei de la mamă, în urma ligaturării cordonului ombilical.

Refacerea depozitului de glicogen hepatic se realizează abia în a 2-a săptămână de viață extrauterină, cu condiția unui aport exogen suficient în hidrocarbonate.

Sinteza glucidelor din glicerolul din lipide și din proteine (gluconeogeneza) la nivel hepatic se realizează într-o proporție mică la nou-născut, explicând hipoglicemia. Capacitatea celulei hepatice de a conjuga bilirubina cu acidul glucuronic este redusă, motiv pentru care bilirubina va fi eliminată în cantități prea mari în primele zile după naștere.

Deficiența ficatului în sinteza factorilor coagulării sângelui este evidențiată la nou-născut prin apariția riscului microhemoragiilor postnatale.

Dacă mucoasa intestinală este alterată morfologic și funcțional, bacteriile, virusurile, endo- și exotoxinele ajunse în tractul digestiv al nou-născutului pot trece în circulația generală, producând diverse îmbolnăviri.

Laptele matern conține nu numai anticorpi, dar și leucocite și o serie întreagă de alte substanțe care vor interfera cu flora bacteriană ce colonizează intestinul nou-născutului, prevenind pătrunderea antigenelor în organism.

Metabolismul bazal al nou-născutului este mai crescut de două ori față de adult, ceea ce explică reducerea în greutate cu 5–10% sau cu 20% a acestuia în primele 2–3 zile după naștere.

Suprafața corporală este mult prea mare comparativ cu greutatea nou-născutului, încât și pierderile de căldură vor fi apreciabile. Iată de ce, în primele ore după naștere, se constată o scădere bruscă a temperaturii corporale cu 3–4°C, care apoi revine la valorile inițiale după 7–8 ore, dar suferă mici variații în primele zile de viață extrauterină. Este vorba și despre imperfecțiunea termostatlui nervos hipotalamic la nou-născut, care nu poate încă realiza homeostazia termică. La prematuri, hipotermia este mai pronunțată, motiv pentru care aceștia se mențin în incubatoare cu temperatură constantă pentru că nu-și pot regla singuri temperatura optimă supraviețuirii.

La făt, 70% din energia utilizată pentru dezvoltare este acoperită prin oxidarea glucozei ce provine din organismul matern, 5–20% din sinteza lactatului la nivel placentar și 20% din aportul matern de aminoacizi.

Imediat după naștere, producția calorică este de 35–40 kilocalorii/zi, ceea ce impune o sursă corespunzătoare de materiale energogene aduse prin alăptare, gavare sau pe cale parenterală (intravenoasă). În primele ore după naștere, cătutul respirator scade de la valoarea 1 la 0,7, ceea ce denotă degradarea lipidelor endogene, deoarece glicogenul hepatic este deja metabolizat. Dacă aportul exogen energetic nu este suficient, apar hipoglicemia, acidoza, insuficiența cardio-respiratorie, hipotermia și moartea nou-născutului.

Funcțiile sistemului nervos sunt puse în evidență încă din a 3-a – a 4-a lună de gestație, deși nici după naștere acestea nu sunt perfecte. După primul trimestru de sarcină, reflexele periferice ale fătului sunt prezente, cu o perfectare a lor spre sfârșitul ultimului trimestru. Deși începutul procesului de mielinizare a principalelor tracturi nervoase este pus în evidență încă din primele luni de gestație, mielinizarea completă a tracturilor piramidale se realizează abia după primul an de viață extrauterină, permițând motricitatea voluntară, mersul, controlul cortical al micțiunii și defecației etc.

Imaturitatea funcțională a sistemului nervos este explicată și de imaturitatea anatomică a structurilor nervoase. În primul an de viață, creierul copilului crește mult, iar în al doilea an aproape că nu-și modifică greutatea, având la începutul celui de al treilea an de viață greutatea creierului adultului. De altfel, în această perioadă s-au închis suturile și fontanelele oaselor capului, încât nu este permisă dezvoltarea în continuare a țesutului cerebral.

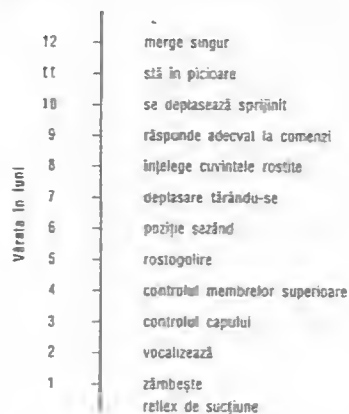


Fig. 15.9. Manifestările copilului în primul an de viață.

Deficiența metabolică a mamei diabetice va induce la făt o dezvoltare necorespunzătoare somatică și nervoasă și un grad înalt de mortalitate intrauterină sau imediat după naștere. Copiii născuți cu semne de hermafroditism sunt proveniți din mame care au primit un tratament cu androgeni în exces sau care au dezvoltat o tumoră secretorie de androgeni în cursul gestației.

Sistemul endocrin la nou-născut este bine dezvoltat comparativ cu rinichiul, ficatul, sistemul nervos central, încât nu se întâlnesc prea des în practica medicală disfuncții endocrine în această perioadă a vieții, decât unele temporare, ce țin de organismul matern.

Necesarul în substanțe minerale și vitamine se asigură la făt de către circulația feto-placentară. Pe parcursul gestației, fătul depozitează în medie 22,5 g de calciu și 13,5 g de fosfor, în special în ultima lună, când aceste elemente sunt absolut necesare pentru creșterea în greutate și pentru osificarea scheletului fetal. Până în luna a 4-a de gestație, scheletul fătului are doar o structură cartilagineasă, după care urmează impregnarea cu săruri de calciu și apariția țesutului osos dur.

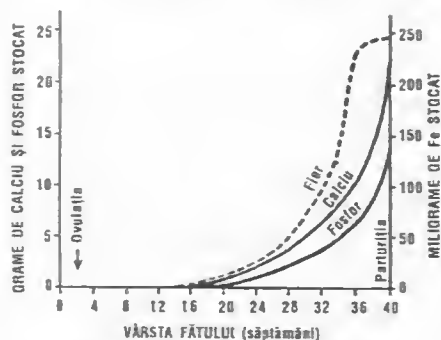


Fig. 15.10. Stocarea fosforului, calciului și fierului în organismul fetal.

Comportamentul copilului în primul an de viață este redat în fig. 15.9, care arată progresele psiho-motorii ale acestuia în funcție de dezvoltarea anatomică a sistemului nervos central, constituind criterii de apreciere a stării de sănătate.

Aportul insuficient de substanțe proteice atât în dieta gravidei, cât și a copilului după naștere va duce nu numai la un deficit în dezvoltarea somatică, dar și în cea a sistemului nervos central, cu grave tulburări senzoriale și mentale.

În sfera endocrină pot apărea unele modificări care, de cele mai multe ori, reprezintă răspunsul unor tratamente hormonale la femeile gravide sau al unor boli endocrine ale acestora. Dacă hipofiza anterioară a mamei va secreta cantități crescute de tireotrop în timpul sarcinii, copilul se va naște cu un oarecare grad de hipertiroidie sau va manifesta o hipotiroidie temporară dacă mama s-a tratat cu exces de hormoni tiroidieni ori dacă ea prezintă un grad de hipertiroidie.

Copiii nou-născuți din mame diabetice vor prezenta o hipersecreție insulinică, ceea ce le va produce o hipoglicemie până la 20 mg/dl.

Lactația va asigura în continuare un aport suficient și necesar definitivării procesului de osificare a nou-născutului.

Vitamina D nu interesează prea mult creșterea în greutate a fătului, dar este absolut necesară în organismul matern pentru absorbția calciului la nivelul tractului său gastro-intestinal. Această vitamină trece din circulația mamei în cea a fătului și se poate depozita în ficat, de unde va fi utilizată în perioada de nou-născut. Finalizarea osificării necesită după naștere un aport crescut de calciu, furnizat de către laptele matern, dar, pentru a se absorbi în intestin, calciul are nevoie de prezența vitaminei D. Deficitul în această vitamină produce la copil rahitismul, mai evident la prematuri.

Față de calciu și fosfor, fierul este mai repede fixat în organismul fetal (fig. 15.10) începând cu a 3-a săptămână de gestație, când este absolut necesar

sintezei de hemoglobină. Endometrul progestativ fixează, de asemenea, o anumită cantitate de fier, pe care o va ceda celulelor trofoblastului în vederea realizării la făt a eritropoezei. Restul fierului provenit de la mamă se va fixa în ficat ca depozit (aproximativ 1/3), de unde va fi livrat postnatal în procesul de sinteză continuă a hemoglobinei, pe parcursul următoarelor 4-6 luni de viață, fiind suficient chiar în condițiile în care nou-născutul nu ar primi deloc fier prin alimentație.

În situația în care dieta mamei pe parcursul gestației nu i-a asigurat un aport suficient de fier și, deci, fătul și nou-născutul nu dispun de acest element în depozitul hepatic, în următoarele 2-3 luni de la naștere se instalează o anemie severă.

Ca și la adult, prezența vitaminelor în organismul fetal și al nou-născutului este obligatorie, deoarece, jucând rol de biocatalizatori, vitaminele vor favoriza și vor accelera unele procese metabolice („aminele vieții”).

Complexul vitaminelor B este necesar proceselor oxido-reductoare atât de intense la făt și nou-născut, în special vitamina B₁₂ și acidul folic, care favorizează creșterea organismului și în special hematopoieza.

Vitamina C condiționează formarea țesuturilor fibroase din organism și ajută la prefigurarea matricei cartilaginease și apoi osoase a viitorului os. Țesuturile fetale nu depozitează vitamina C, ceea ce impune și la făt și la nou-născut un aport zilnic în această vitamină. Laptele matern va asigura nou-născutului cantitatea necesară de vitamină C pentru procesele oxido-reductoare ale organismului, cât și pentru sinteza structurilor intercelulare, alături de aportul în dietă al acidului ascorbic din sucul de citrice după a 3-a săptămână de viață extrauterină.

Vitamina E este necesară dezvoltării și segmentării oului, deficitul său producând avortul spontan.

Vitamina K ajută din circulația maternă la făt va favoriza sinteza protrombinei și a factorului VII al coagulării sângelui la nivelul ficatului fetal. Deficitul de vitamină K realizează la făt și la nou-născut microhemoragii în diferite proporții, favorizate de traumatismul obstetrical. Abia după prima săptămână de viață extrauterină, când se formează flora microbiană în colonul nou-născutului, se inițiază procesul sintezei vitaminei K, în prezența căreia ficatul realizează sintezele amintite.

Ficatul poate fi considerat un fel de „grefă străină”, din punct de vedere genetic, în organismul mamei. Fătul și placenta conțin antigene de histocompatibilitate de origine paternă, total străine pentru organismul mamei, care se poate apăra imunologic.

Celulele sinciului trofoblastic sunt blocate în reacția lor antigenică prin prezența la nivelul lor a unei substanțe ce conține sialomucină, care le acoperă. Această substanță nu permite reacția imunologică între celulele fetale și limfocitele materne.

În cursul sarcinii, reactivitatea imunologică maternă scade, dovedită prin faptul că timusul involuează, iar rezistența mamei față de unele infecții este mai redusă. Cercetările *in vitro* au pus în evidență proprietăți imunosupresive ale gonadotrofinei coriale și ale somatomamotrofinei coriale. Se aduce, de asemenea, în discuție prezența unor anticorpi blocați ce apar în cursul sarcinii și care produc la mamă o hiporeactivitate imunologică.

În situația în care limfocitele materne nu sunt inhibitate de către acești anticorpi și trec prin placenta, ar trebui să realizeze un impact imunologic în organismul fătului, mai ales că placenta nu este total impermeabilă față de celulele din sângele mamei. Se cunosc date care atestă faptul că prin placenta trec și celulele fătului către mamă și ale mamei către făt, bineînțeles, în procentaj redus.

Nu apare reacție imunitară în organismul fătului, presupunându-se că secreția de către placenta a unei alfa-sialoglicoproteine (fetuină) are rol imunosupresor la făt și este prezentă în circulația acestuia și după naștere, blocând răspunsul imunologic fetal.

Cercetări mai recente arată că, începând cu săptămânile a 9-a-a 12-a de viață intrauterină, celulele hepatice fetale reacționează totuși la antigene străine. Important este faptul că fătul se naște cu o putere imunitară umorală provenită de la mamă, care-l protejează de agresiunile antigenice în primele 5-6 luni de viață extrauterină.

Folosind markeri genetici, s-a putut demonstra că IgG din sângele cordonului ombilical provine de la mamă și că în primele luni de sarcină pasajul acestei imunoglobuline de la mamă la făt este mult mai lent decât spre sfârșitul gestației. Imunoglobulinele M se găsesc în cantități foarte mici la făt, iar IgA nu s-a pus în evidență. Această imunoglobulină se transmite nou-născutului prin alăptare, apărându-l de infecțiile digestive.

Fătul prezintă o imperfecțiune și a mecanismelor sale nespecifice imunitare. Astfel, puterea opsonocitofagică a serului fetal este mult scăzută față de adult, existând un deficit de IgM, properdină și C₃ din complement.

După 20 de săptămâni de gestație, sistemul imunocompetent poate răspunde la antigenii externi. Deși celulele sistemului limfoid se înmulțesc în a doua parte a gestației, maturarea sistemului imunitar continuă mult timp postnatal, până la pubertate. Dacă concentrația IgG atinge valoarea adultului după un an de viață, cea a IgA va avea această valoare abia după 8-10 ani.

Către sfârșitul primei luni de viață extrauterină, nou-născutul prezintă o reducere la jumătate a concentrației gamma-globulinelor serice – suportul anticorpilor, ceea ce va corespunde unei scăderi evidente a apărării imunitare, concentrație care va reveni la normal abia după 6-20 de luni de viață extrauterină.

Anticorpii proveniți de la mamă, fie prin circulația feto-placentară, fie prin colostru sau laptele matern, vor proteja nou-născutul în primele 6 luni de viață față de o serie de infecții grave, cum ar fi poliomielița, difteria, variola.

Reacția alergică la nou-născut se întâlnește foarte rar. După perioada de nou-născut, odată cu maturizarea capacității de sinteză a anticorpilor, pot apărea la copii reacții alergice, ca eczeme, diverse manifestări gastro-intestinale etc.

15.5. NAȘTEREA

Realizarea expulziei produsului de concepție este posibilă dacă există o concordanță fiziologică între mai mulți factori ce țin de organismul matern, de placenta și de făt.

15.5.1. FACTORI DE DECLANȘARE ȘI ÎNTREȚINERE A TRAVALIULUI

Factorii materni. Sunt în primul rând de natură uterină, produși de dezvoltarea și creșterea componentelor uterului pe parcursul gestației, înmulțirea aferențelor senzoriale de la sfera uterină spre formațiunile nervoase superioare, modificări biochimice în deciduă, pe măsura creșterii vârstei sarcinii, traduse prin eliberarea unor cantități mai mari de mediator chimici (histamină, catecolamine, kinine) sau de prostaglandine, atât în deciduă, cât și în lichidul amniotic.

Pe parcursul sarcinii, uterul suferă o creștere și o dezvoltare impresionantă, încât de la lungimea de 6-7 cm evoluează până la 30-35 cm și de la o capacitate de 4-5 ml ajunge la cea de 5000 ml.

Miometrul va suferi un proces de hiperplazie și hipertrofie, atingând în a 4-a lună de gestație grosimea de 2 cm, timp în care se înmulțesc și organitele celulare (mitocondrii, ribozomi, reticul endoplasmatic, aparat Golgi). Spre sfârșitul gestației crește distensibilitatea uterului, al cărui perete se reduce în grosime, fiind doar de 0,5-1 cm, uterul devenind un organ sferoid.

În componența miometrului se găsesc în părți egale fibre musculare propriu-zise și țesut conjunctiv cu fibre colagene și elastice, pe baza cărora se va dezvolta uterul pe parcursul gestației și nu va opune o rezistență parietală față de presiune, dar asigurând echilibru în irigația materno-placentară.

Fibrele musculare miometrice se dezvoltă mult pe parcursul sarcinii. De la lungimea de 50-90 mm ajung la cea de 800 mm, și de la o grosime de 3-4 mm la cea de 10 mm, ducând implicit la acumularea proteinelor contractile și a materialului energogen necesar contracției. Pe măsura dezvoltării celulelor miometrice, crește mult și suprafața lor, cu înmulțirea și a receptorilor membranari față de histamină, adrenalina și noradrenalină, bradikinină, oxitocină, cu mari implicații în procesul nașterii.

La nivelul regiunii istmico-cervicale predomină fibrele conjunctive și elastice, fibrele musculare fiind în proporție doar de 10%, ceea ce explică distensibilitatea mare a acestei zone în momentul travaliului.

Administrarea la șoarece de estrogeni și relaxină a arătat o reducere a consistenței colului uterin, prin creșterea conținutului în apă a sectorului extracelular, ceea ce dovedește rolul hormonilor placentari în modificările țesutului conjunctivo-elastic al colului și segmentului uterin atât în cursul sarcinii cât și al

nașterii. În perioada de dilatație a acestei zone au fost puse în evidență la microscopul electronic țesături și îngustări ale fibrelor colagene și elastice datorită activării collagenazelor și a proteazelor de la acest nivel, iar în substanța fundamentală s-a constatat o acumulare de hidroxiprolină, tirozină și fenilalanină.

Astfel, în cursul sarcinii și parturii între corpul și colul uterin sunt manifeste nu numai deosebiri morfologice, dar și biochimice, care vor explica diferența de comportament a acestor zone în perioada de contracție și de relaxare.

Factorii extrauterini, implicați în mecanismul nașterii, includ modificările organismului matern și ale relației mamă-placentă, aspecte ale îmbătrânirii placentei și ale deficitului său nutrițional, modificări ale toleranței imunologice placentare, diverși factori neuro-endocrini etc.

Factorii fetali prezintă o deosebită importanță în declanșarea travaliului. Este vorba despre o serie de secreții hormonale crescute la făt, în special în ultimul trimestru, cum este cazul TSH și ACTH.

Corticotropul hipofizar, cât și secreția corticoizilor ar explica dezvoltarea funcțiilor plămânului sau ale altor organe în vederea adaptării la viața extrauterină, cât și răspunsul fătului la efortul de expulzie.

Axul hipotalamo-hipofizo-corticosuprarenal pare să aibă un rol deosebit în declanșarea nașterii la specia umană, mai ales că nivelul plasmatic al corticoizilor este mult ridicat înainte și în timpul travaliului, nașterea putându-se declanșa și prin injectarea în lichidul amniotic de corticosteroidi; imaturii prezintă, de asemenea, o dezvoltare evidentă a glandelor corticosuprenale.

Dacă în momentul nașterii se dozează în sângele cordonului ombilical oxitocina și vasopresina, acești doi hormoni se vor găsi în concentrație mult mai mare în sângele fetal, decât în cel recoltat de la mamă. Acest fapt dovedește că în procesul nașterii participă în special oxitocina fetală și mai puțin cea de proveniență maternă, eliberată ca răspuns la hipoxia care se instalează în organismul fătului în perioada de expulzie.

Factorii placentari. Placenta – ca organ tranzitoriu – cu o importanță deosebită respiratorie, nutritivă, endocrină și excretorie pentru făt, va interveni activ și în procesul nașterii.

Funcția endocrină a placentei are o semnificație aparte, tradusă prin posibilitatea sintezei unor hormoni proteici și sterolici, așa cum am văzut. Din ultima categorie amintim estrogenii și progesteronul, al căror raport se inversează spre sfârșitul sarcinii față de faza inițială.

Creșterea sintezei de progesteron va determina reducerea excitabilității miometrului și apariția relaxării uterului, prin intensificarea activității beta-receptorilor adrenergici, fenomen întâlnit până în faza de prenaștere.

În momentul declanșării travaliului se inversează raportul secretor estrogeni-progesteron, crescând secreția estrogenilor și diminuându-se cea a progesteronului. În acest fel, estrogenii vor stimula alfa-receptorii adrenergici, care vor produce creșterea excitabilității și contractilității miometrului. Acești hormoni placentari influențează și permeabilitatea membranelor față de ioni, realizând depolarizarea sau hiperpolarizarea acestuia. Progesteronul placentar în concentrație normală are efect hiperpolarizant, cu reducerea concentrației K⁺ intracelular și scăderea potențialului de membrană până la valoarea de -60 mV, în special în zona de inserție a placentei.

Blocând transporturile active transmembranare, prin blocarea ATP-azei, se reduce și fenomenul de cuplare a excitației cu contracția, încât progesteronul realizează liniștea uterină.

Concentrația progesteronului în timpul gestației este mare, atât în spațiul intracelular, cât și în cel extracelular, deoarece placenta la termen secretă progesteron într-o concentrație medie de 250 mg/24 h.

În timp ce progesteronul reduce excitabilitatea și contractilitatea miometrului, prin acțiunea asupra unor receptori specifici, estrogenii secretați de placenta, în special spre sfârșitul ultimului trimestru, vor stimula contracția uterină, producând o creștere a concentrației de noradrenalină și acetilcolină, care vor activa pompele active ionice, ducând la apariția unui potențial de acțiune propagabil, declanșator de contracții.

În declanșarea nașterii intervin, deci, în deplină unitate atât factorii placentari și fetali, cât și cei materni, care vor acționa asupra miometrului pregătit morfologic și funcțional de către secrețiile endocrine din perioada gestației și a travaliului (vezi fig. 4.7).

O serie de autori au încercat să explice nașterea prin intervenția oxitocinei, aducându-se în discuție o serie de fapte experimentale care susțin ipoteze, dar și fapte care o infirmă. Pe măsura creșterii sarcinii, uterul gravid devine tot mai receptiv la oxitocină, iar nașterea poate fi declanșată și prin administrarea

exogenă de oxitocină; dar este, de asemenea, real și faptul că blocarea eliberării factorilor retrohipofizari nu afectează evident contracția miometrului.

Studii radioimunologice recente au pus în evidență faptul că în cursul travaliului nu apar modificări semnificative ale concentrației oxitocinei în sângele și urina parturientei, după cum femeile cu diabet insipid pot naște în condiții normale, deși eliberarea hormonilor retrohipofizari este total insuficientă.

Oxitocina de origine fetală își adaugă efectul celei de origine maternă în vederea realizării unei contracții eficiente uterine; spre sfârșitul sarcinii s-a pus, de asemenea, în evidență și o reducere marcată a activității oxitocinazei – enzimă ce degradează oxitocina.

În ultima vreme se aduce în discuție intervenția prostaglandinelor în procesul nașterii, ținând cont de faptul că, prenatal și în cursul travaliului, crește mult concentrația prostaglandinelor F_2 , $alpha$, E_1 și E_2 în decizia și în lichidul amniotic. Se consideră că estrogenii stimulează sinteza de ARNm, esențial în producerea PG sintetazei la nivelul endometriului. Atât prostaglandinele, cât și oxitocina acționează specific asupra receptorilor endometriali, stimulând intrarea ionilor de calciu în celulă și declanșarea contracției miometrului (fig. 15.11).

Produsele medicamentoase cu rol antiinflamator, de tipul indometacinei, care scad sinteza de prostaglandine prin blocarea ciclooxigenazei, reduc contractilitatea uterină și prelungesc nașterea.

Reducerea activității unor enzime de inactivare a 5-HT și noradrenalinei, cum este monoaminoxidaza, ar favoriza inițierea contracției uterine din timpul travaliului, la care se adaugă și efectul oxitocinei.

Important este și faptul că spre sfârșitul gestației placenta suferă un proces de îmbătrânire, iar din săptămâna a 38-a de gestație crește mult titrul anticorpilor antitrofoblastici, denotând pierderea capacității secretorii a placentei și a toleranței imune.

Constatările amintite scot în evidență faptul că la declanșarea nașterii participă factori hormonal de origine maternă, placentară și fetală și că axul hipotalamo-hipofizo-corticosuprarenal al fătului se activează spre sfârșitul gestației, eliberând însemnate cantități de vasopresină și oxitocină, alături de corticoizi, care

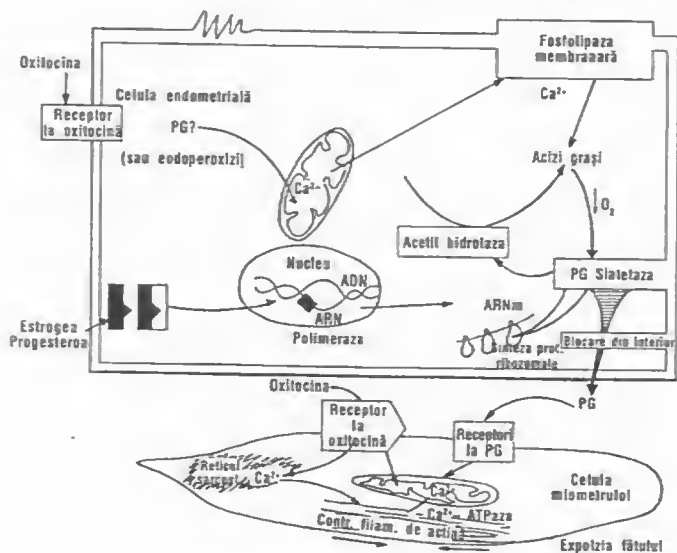


Fig. 15.11. Stimularea pătrunderii Ca^{2+} în miometru de către prostaglandine și oxitocină, în vederea declanșării contracției.

realizează contracția pe un uter cu miometru bine pregătit din punct de vedere biochimic și bioelectric încă din cursul gestației. Dezechilibrul acestor trei mari categorii de factori, care se completează unul pe altul, duce la apariția aspectelor anormale ale procesului de gestație și naștere.

Miometru este considerat a avea automatism propriu pe baza prezenței a doi centri comandanți (*pace-maker*). Localizați bilateral în regiunea de origine a trompelor uterine, cu o activitate mai mare a celui din dreapta.

Depolarizarea inițială în regiunea *pace-maker*-ilor se propagă din aproape în aproape în întreaga masă uterină, realizând un răspuns contractil, a cărui viteză de propagare este de 1–2 cm/s, astfel încât în 10–20 de secunde întregul miometru este în stare de contracție (fig. 15.12).

În momentul travaliului, unele zone uterine sunt în contracție, altele în relaxare, existând permanent o activitate sincronizată a acestora. Este evident faptul că propagarea undei contractile se face din zona fundică a uterului spre col, că intensitatea contracției se reduce dinspre zona fundică către colul uterin și că durata contracției este mai mare în zona fundică decât în cea a colului.

Cercetări moderne de electrofiziologie (electromiografie, înregistrarea variațiilor de presiune intraamniotică, presiune miometrială, studii de histochimie) au pus în evidență faptul că în desfășurarea travaliului este vorba despre un proces de autoreglare mingenă, deoarece există mari variații ale caracteristicilor contracțiilor în diferite etape ale travaliului, explicate și prin unitatea funcțională corp uterin-zona cervicală-segment.

Din punct de vedere funcțional, se consideră că miometru conține un fel de unități contractile care într-un anumit moment se află în contracție, altele în fază de relaxare, altele în fază de recrutare a stimulului etc. Pe măsura avansării vârstei produsului de concepție crește numărul unităților active, iar când se declanșează nașterea crește numărul unităților în stare de recrutare, capabile să realizeze atât o frecvență, cât și o amplitudine mai mare a contracției uterului. În zonele coarnelor uterine, unde se găsesc *pace-maker*-ii, sunt prezente mai multe unități active care intră în acțiune sincron și constituie locul de unde contracția pleacă spre col.

Oxitocina reduce perioada refractară a unităților miometrice, crescând numărul celor ce sunt în stare de recrutare a stimulului, în timp ce substanțele beta-stimulante mențin sincronizarea unităților active.

La nivelul uterului în travaliu se succedă mai multe fenomene, și anume: contracția, propagarea contracției și relaxarea, explicând comportamentul diferențiat al diverselor zone uterine în travaliu. Din acest motiv, punga amniotică, fiind un sistem hidrolic, va ajuta la transmiterea efectului contracției uterine spre structurile cervicale, având și rol de adevărat piston, atâta vreme cât membranele sunt integre.

În cursul travaliului cresc progresiv amplitudinea și durata contracției uterine, cu scăderea rezistenței zonei cervicale, lichidul amniotic repartizând uniform contracția pe întreaga masă a miometrului.

Ca în întreaga musculatură netedă în care plasticitatea este caracteristică, și, prin urmare, distensia sau retracția nu modifică presiunea din pereții organului, și la nivelul uterului ruperea membranelor va crea retracția miometrului, dar forța contractilă rămâne aceeași. Toată forța contractilă a uterului se va dirija spre zona segmentului cervical în momentul ajungerii fătului în strâmtoarea superioară a bazinului, iar, pe măsura pătrunderii acestuia în zona intrapelvină, zona fundică se va contracta aproape tonic.

Ruperea prematură a membranelor va duce la o repartitie inegală a forței contractile asupra fătului, la dilatația mai rapidă a colului, dar și la pierderea unei părți din forța contractilă, care se va manifesta nu numai longitudinal pe făt, ci și centrifug, realizând tulburări de irigare deciduală. Ruperea membranelor va realiza nu numai contracția izometrică și izotonică a miometrului, dar și eliberarea unei cantități mai mari de oxitocină, cu punct de plecare reflex, reprezentat de zona destinsă a colului.

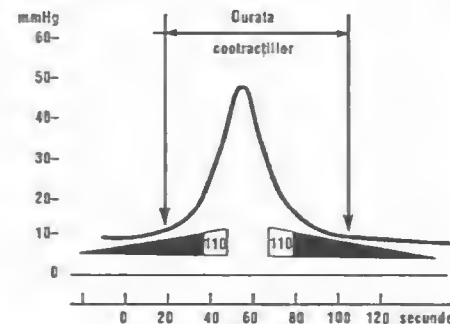


Fig. 15.12. Răspunsul contracțiilor uterului, la naștere.

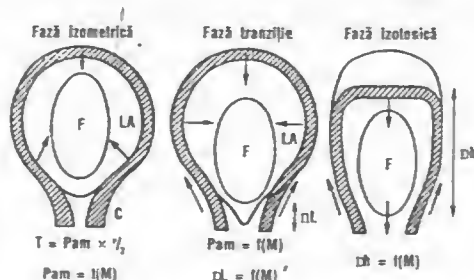


Fig. 15.13. Aspectul uterului în timpul travaliului. F, fătul; LA, lichidul amniotic; C, cervical; M, musculatura uterină; Δh , gradul compresiunii; ΔL , diferența de presiune intrauterină; T, presiunea intrauterină în faza izometrică; P_{am} , presiunile intrauterine în faza de tranziție și faza izotonică.

contracțiilor de naștere tonusul uterin este doar de 3,87 mmHg, atunci când dilatația colului atinge 7 cm tonusul va avea o valoare medie de 14 mmHg.

Un alt parametru al contracției miometrice este *amplitudinea contracțiilor*, exprimată de diferența, în mmHg, dintre presiunea maximă a lichidului amniotic și valoarea tonusului. Amplitudinea contracției crește progresiv spre finalizarea procesului nașterii, având o valoare medie de 26 mmHg la inițierea travaliului și de 50 mmHg când dilatația colului depășește 7 cm.

În momentul în care se declanșează nașterea, frecvența contracțiilor este redusă – aproximativ 2–3 contracții în 10 minute, iar, spre sfârșitul travaliului, în aceeași perioadă de timp pot fi 5–6 contracții. Practica medicală a demonstrat existența unui paralelism între frecvența și amplitudinea contracțiilor, în special în a doua parte a dilatației colului uterin, când diametrul acestuia depășește 5 cm.

După expulzia produsului de concepție se elimină și placenta, datorită continuării contracțiilor miometrice și după perioada nașterii propriu-zise. Valoarea presiunii intrauterine poate să atingă în acest timp 150 mmHg, ducând, prin contracția și retracția miometrice, la apariția unui hematom retroplacentar (100 ml sânge), datorită reducerii suprafeței de inserție a placentei și rușii vaselor prin desprinderea unor zone placentare.

Eliminarea placentei se realizează după aproximativ 45 de minute de la expulzia fătului, cu o pierdere de sânge de aproximativ 400 ml, din care 100 ml aparțin hematomului retroplacentar, iar 300 ml vaselor uterine.

Retracția progresivă a miometricei alături de intervenția factorilor coagulării realizează hemostaza fiziologică.

15.5.2. MODIFICĂRI ALE FLUXULUI SANGVIN UTERO-PLACENTAR ȘI ALE PLACENTEI ÎN TRAVALIU

În cursul travaliului este modificat fluxul sanguin al fătului, majoritatea autorilor demonstrând prin metode moderne (injectări intraplacentare de Xe radioactiv, fluxmetria prin dispersie calorică, debitmetrie cu izotopi radioactivi etc.) o reducere a acestuia în timpul maximului contracțiilor și al începutului fazei de decontracție.

Important este că faza de contracție miometrică reduce circulația venoasă, deși în momentul inițierii sale se trimite în venele utero-pelvine o cantitate de aproximativ 300 ml sânge.

Când presiunea de contracție depășește 50–60 mmHg, fluxul sanguin al miometricei și cel utero-placentar se reduc cu peste 50% sau se pot suprima complet, față de relaxare, când refluxul venos crește.

Repartiția forțelor contractile miometrice în diverse faze ale travaliului este diferită ca mărime și ca sens, deoarece uterul are o structură heterogenă din punct de vedere histologic, după cum și diferențele de tensiune dintre un câmp situat în zona corpului uterin și altul din zona cervico-istmică sunt foarte mari (fig. 15.13).

Procesul de expulzie a fătului se opune doar rezistența elastică a zonei cervicale, care se va dilata în ultimă instanță prin suprapunerea atât a presiunii realizate de membrane, cât și a greutatei fătului.

Pentru realizarea nașterii, miometrul trebuie deci să se contracte, dar și între contracții trebuie să prezinte o anumită stare de tonus, ce corespunde la un minimum de presiune exercitată pe conținut. Valoarea tonusului miometricei diferă în funcție de integritatea membranelor și de gradul de dilatație a zonei cervicale. Dacă la declanșarea

Sunt situații în care, datorită contracției prea puternice a uterului, crește mult presiunea sângelui intervillitar, constituind o cauză serinasă de hipoxie fetală și posibilă decolare precoce a placentei.

În faza de expulzie, hemodinamica feto-placentară este cel mai mult afectată prin blocarea totală a circulației din spațiile intervillitare. Administrarea de beta-stimulante crește debitul sanguin intervillitar, favorizând circulația feto-placentară, ceea ce explică rolul receptorilor beta-adrenergici în hemodinamica feto-placentară și ca elemente miorelaxante.

În iminențele de avort se obțin bune rezultate utilizând perfuziile cu beta-stimulante, putându-se prelungi gestația cu 1–2 luni, ca urmare a îmbunătățirii circulației feto-placentare și, în general, a fluxului uterin.

Placenta suferă un proces de dezvoltare morfologică și funcțională sub acțiunea factorilor endocriini materni, îndeplinind rol nutritiv, respirator, excretor, endocrin etc. pentru făt. Începând cu a 5-a lună de gestație, placenta suferă un proces de involuție, de îmbătrânire, deși se consideră că are un maximum metabolic și funcțional în jurul celei de a 36-a săptămâni de gestație. La această vârstă a sarcinii, transportul activ al Na^+ marcat este maxim, iar sinteza corionică a ADN este, de asemenea, maximă. Spre sfârșitul sarcinii, odată cu scăderea procesului de creștere fetală, schimburile placentare se reduc. Procesele degenerative placentare se manifestă după a 35-a săptămână de gestație, prin îngustarea și degenerarea vilozităților terminale, hipoplazie sincițială, edem sincițial, tromboză și necroză. În cazul sarcinilor multiple sau al gravidelor hipertensive înainte de sarcină, fluxul sanguin utero-placentar scade mai evident, astfel încât și aspectul microscopic descris este mai marcat.

Insuficiența circulației feto-placentare explică un procentaj de peste 30% al deceselor prenatale și de peste 60% al sechelelor postnatale.

Dacă fluxul sanguin intervillitar este de 600 ml/min în placenta normală, modificările hemodinamice degenerative realizate de depunerea de fibrinid, ateromatoză și ateroscleroza arterelor spirale vor realiza o reducere a acestuia până la valoarea de 300 ml/min, ceea ce scade simțitor irigația fătului.

Insuficiența placentară, ca urmare a apariției proceselor distructive trofoblastice și a deficitului sanguin utero-placentar, va avea grave repercusiuni asupra circulației feto-placentare cu hipoxierea fătului. În timpul travaliului, o placenta normală răspunde adecvat contracțiilor uterine, datorită rezervei sale funcționale, spre deosebire de una cu insuficiență, ca în cazul disgravidilor, care va antrena o evidentă reducere a fluxului feto-placentar, hipoxierea fătului și chiar moartea lui.

15.5.3. MODIFICĂRI ALE DIVERȘILOR PARAMETRI FUNCȚIONALI LA FĂT ÎN TIMPUL NAȘTERII

Frecvența cardiacă fetală normală este cuprinsă între 120–140 de bătăi/min. Creșterea sau scăderea frecvenței cardiace cu 19 bătăi/min este considerată în limitele normalului.

Implantarea microelectrozilor intra- sau extraamniotic a dus la faptul că în timpul contracțiilor uterine din travaliu nu se modifică semnificativ frecvența cardiacă a fătului, putând constitui un parametru foarte bun de apreciere a modului în care se realizează travaliul.

Diminuarea fluxului sanguin și a schimburilor de la nivelul placentei, cu apariția hipoxiei și acidozei fetale, se poate traduce prin modificări ale frecvenței cardiace fetale.

Dacă presiunea intracraniană a fătului depășește în cursul travaliului 30–50 mmHg, apare o reducere a fluxului sanguin cerebral, cu răspuns hipertensiv în circulația sistemică și bradicardie hipoxică sau reflexă, cu participarea baroreceptorilor oaselor cutiei craniene, excitați de compresiunea dată de hiperpresiunea lichidului amniotic.

Un grad ușor de hipoxie fetală realizează o discretă acidoză, care va crea, totuși, tahicardie și hipertensiune, reducerea fluxului sanguin periferic și o mai bună irigație a cordului, creierului, placentei.

Dacă hipoxia continuă, va crește rezistența vasculară placentară, cu reducerea fluxului sanguin ombilical și apariția unor grave leziuni cerebrale sau cardiace la făt, urmate de moarte.

Se consideră că bradicardia fetală se manifestă atunci când presiunea parțială a O_2 este doar de 20 mmHg, cu o saturație arterială de 25–30%, impunându-se mobilizarea promptă a mecanismelor endocrine corectoare.

15.5.4. ADAPTĂRI ENDOCRINE ÎN SARCINĂ ȘI TRAVALIUL

Începând cu al treilea trimestru de sarcină, axul hipotalamo-hipofizo-corticosuprarenal de la făt are o activitate autonomă, răspunzând într-o măsură mică la excitanții hormonal materni.

În cursul travaliului se constată o creștere a activității acestui complex, evidențiată periferic prin valori crescute de ACTH și de hormoni glucocorticoizi. În cordonul ombilical al nou-născutului corticoizii au o valoare medie de 5–20 mg/dl, de două ori mai mult față de adult, și datorită faptului că ficatul încă nu are perfectată funcția de inactivare hormonală prin glucurononjugare.

Cercetări recente au pus în evidență creșterea valorii androgenilor la fătul prematur față de cel născut la termen, tot ca un răspuns corticosuprarenal față de stresul nașterii.

Medulosuprarenala își intensifică secreția în faza nașterii, constatându-se atât creșterea concentrației catecolaminelor în lichidul amniotic, cât și în cordonul ombilical, alături de apariția unor manifestări cardio-vasculare, cum ar fi tahicardia.

Secreția tiroidiană este intensificată în perioada travaliului și se menține crescută și în primele zile după naștere. S-a pus în evidență o creștere a T_3 și T_4 în sângele fetal, ca urmare a creșterii sintezei de tiroglobulină și de intensificare a secreției de TSH hipofizar. Încă din al doilea trimestru de sarcină, controlul hipotalamusului asupra hipofizei și, prin aceasta, a tiroidei este evident, iar din ultimul trimestru se manifestă și secreția placentară de tirootrop, în vederea pregătirii fătului pentru a face față efortului de adaptare la condițiile nașterii.

15.5.5. ADAPTĂRI METABOLICE ÎN SARCINĂ ȘI TRAVALIUL

Metabolismul glucidic este intensificat în perinada dezvoltării intrauterine și în travaliu, glucoza fiind principala sursă energetică utilizată, ajunsă la făt prin transportul activ facilitat transplacentar.

Rezervele de glicogen hepatic la făt ating valoarea de 90–100 mg/g țesut, mai mult de două ori față de adult, cele cardiace de 10 ori mai mari ca la adult, iar cele musculare de aproximativ 3 ori mai mari.

Reglarea neuro-endocrină a glicemiei nu se face adecvat, ca urmare a imaturității formațiunilor implicate, încât secreția insulinică la făt în perioada travaliului nu este concordantă cu valorile glicemiei. Rezervele glicogenice amintite permit fătului să-și acopere nevoile metabolice de adaptare la noul mediu creat de naștere, cât și la cele impuse de termoreglare în perinada imediat postnatală. Iată de ce concentrația glicogenului hepatic postnatal, ca și a celui cardiac, va scădea cu mai mult de 80% din valorile amintite, mai cu seamă dacă s-a instalat un grad de hipoxie fetală în faza de pretravaliu.

Dacă în primele 24–48 de ore post-partum cătuș respirator este aproximativ 1, după prima zi de viață extrauterină valoarea sa va ajunge la 0,70 și apoi la 0,85 în condițiile asigurării unei alimentații adecvate nou-născutului, când se vor utiliza glucidele în special pentru metabolismul creierului și al inimii, iar pentru restul organismului vor servi ca sursă energetică în special lipidele.

Metabolismul lipidic este adaptat nevoilor energetice din faza gestației și din travaliu, știind că lipidele sunt intens metabolizate în scop energetic atât de către făt, cât și de către nou-născut.

După 24 de săptămâni de sarcină sunt evidente depozitele de trigliceride și de grăsimi neutre, care se intensifică după a 34-a săptămână prin intrarea în acțiune a insulinei, cu sinteza trigliceridelor și a acizilor grași liberi la nivelul adipocitelor fetale.

Lipidele se vor folosi ca sursă energetică atât în viața intrauterină, cât și în timpul travaliului, numai în condiții de hipoxie, când aportul de O_2 și de glucoză este total insuficient.

Metabolismul proteic: aminoacizii de origine maternă ajung în circulația fetală prin simpla lor difuziune la nivelul placentei și vor fi folosiți de către făt pentru biosinteze proprii în special în ultimele săptămâni de gestație.

Dacă în luna a 3-a concentrația proteinelor în sângele fătului este de 1,6 g/dl, predominând albuminele, la sfârșitul celor 9 luni de gestație valoarea proteinemiei va fi de 6 g/dl, iar raportul albumine/globuline va fi de 3/2.

Dovada faptului că aminoacizii materni se folosesc de către făt nu numai pentru biosinteze, ci și cu scop energogen. o constituie și creșterea concentrației unor produși de catabolism proteic (uree, acid uric, creatinină) în artera ombilicală față de vena ombilicală, în special în faza travaliului.

Echilibrul acido-bazic al fătului în perioada gestației și a nașterii este menținut în special prin intervenția placentei, prin care se transferă fătului O_2 și de la acesta se primește CO_2 .

Difuziunea transmembranară a CO_2 este foarte rapidă și nu se cunosc deosebiri semnificative între PCO_2 din sângele matern și cel fetal.

În același timp, trebuie amintită afinitatea scăzută a hemoglobinei fetale față de CO_2 , cu menținerea unei oxigenări satisfăcătoare.

În perioada travaliului, cu toată împiedicarea circulației feto-placentare de către contracția uterină, pH-ul sanguin nu scade sub 7,25.

Dacă pH scade sub 7,20 este pericol de asfixie pentru făt și nașterea trebuie grăbită. Variațiile pH sanguin la făt nu sunt expresia doar a unei decompensări acido-bazice a acestuia, ci și a unor deficiențe placentare sau materne.

15.5.6. ADAPTĂRI PLACENTARE ÎN SARCINĂ ȘI TRAVALIUL

Adaptările placentare în cursul travaliului se urmăresc indirect, prin controlul activităților cardio-vasculare, respiratorii, intestinale etc., insuficiența placentară realizând aritmii cardiace, tulburări respiratorii etc.

Rolul placentei în elaborarea unor enzime sau a unor hormoni este studiat în ultima vreme pentru diagnosticarea suferinței fetale din timpul gestației sau al travaliului.

În acest scop, s-au studiat unele enzime, cum ar fi oxitocinaza sau fosfataza alcalină, punând în evidență o corelație strânsă între aceste enzime în momentul nașterii.

Biosinteza hormonilor sterolici și proteici de la nivelul placentei este dependentă de metabolismul energetic și de oxigenarea acesteia, care în cursul travaliului poate fi afectată. Scăderea nivelului hormonilor sterolici, a hormonului lactogen placentar, a proteinelor și glicoproteinelor specifice placentare din cursul travaliului indică un grad redus de adaptare a placentei la condițiile impuse de travaliu.

În cursul nașterii apar modificări hemodinamice în spațiul intervilos datorită contracțiilor uterului, care vor influența toate funcțiile placentei, atât cele nutritive și respiratorii, cât și endocrino-metabolice.

Placentele hipoxiate în faza gestației sau cele ale gravidelor diabetice nu vor face față solicitărilor din cursul travaliului, putând amenința prin insuficiența lor funcțională viața produsului de concepție.

15.6.7. DUREREA DIN TIMPUL TRAVALIULUI

Uterul este inervat senzitiv și motor, cu participarea unor structuri vegetative simpatice și parasimpatice diferențiate pentru corpul uterin și pentru zona cervico-istmică.

Aferența senzitivă a corpului împrumută calea simpatcă prin plexul hipogastric, fibre paraaortice și lanțul ganglionar paravertebral, intrând în măduvă la nivelul regiunilor T_{11} – L_1 . De aici, pe calea tractului spino-talamic lateral se transmit excitațiile dureroase spre diencefal și apoi se proiectează cortical în zona lobului postcentral. Aferența senzitivă cervico-istmică este asigurată prin componenta parasimpatcă a plexului pelvin, care culege impulsuri de la această zonă comprinsă atât de prezentatie, cât și de forța contractilă transmisă de la corpul uterului. Excitația ajunge la nivel medular – zona S_2 – S_4 , și de aici va avea cale comună cu cea deja descrisă.

Receptorii din zona perineală, incluzând formațiunile musculo-aponevrotice, tegument și mucoase, vor transmite durerea din timpul travaliului spre măduvă prin ramurile perineale și hemoroidale ale nervilor rușinoși.

În declanșarea senzației de durere din timpul travaliului intervin o serie de factori, printre care ischemia și hipoxia, care vor genera acidoză tisulară, alături de contracția miometrului, relaxarea cervico-istmică și a zonei vagino-perineale, torsiunea și tracțiunea uterină, dar și a celorlalte structuri de suspensie a uterului.

În condițiile hipoxierii unui țesut rezultă o serie de produși catabolici, de tipul acidului lactic și al CO_2 , sau, prin activarea unor proteaze și ciclooxygenaze, apar kinine, de tipul bradikininei, sau prostaglandine.

Acești produși biochimici tisulari vor constitui factori de iritare a terminațiilor senzitive din zona respectivă și apariția senzației de durere. Dacă se distruge experimental cornul posterior al măduvei, impulsul nu mai ajunge în zonele periventriculară și periaeductală și în nucleii rafeului median, încât durerea nu se mai simte.

Cercetări de histochimie au pus în evidență prezența în miometru a terminațiilor nervoase de tip colinergic, adrenergic și a fibrelor P, la care mediatorul chimic este de origine peptidică (substanța P) și care ar putea induce contracția miometrului. Interrelația contracție-durere la nivelul uterin poate fi interferată prin utilizarea produselor antiinflamatoare de tip indometacinei, explicând și rolul prostaglandinelor $F_{2\alpha}$ și E_1 în aceste procese (vezi fiziologia durerii).

15.6. LACTAȚIA

Glandele mamare dezvoltate încă de la pubertate sub influența hormonilor estrogeni vor cunoaște în timpul gestației o proliferare a epiteliului canalelor glandulare și o ramificare a acestora, cu dezvoltarea în special a țesutului stromal, glandular, în care se impregnează grăsimi, limfocite și eozinofile în a doua parte a sarcinii. Conțin, de asemenea, vase de sânge și o inervație simpatică vasomotorie și pentru zona cutanată mamelonară. Inervația parasimpatică lipsește în glanda mamară, fiind stabilit faptul că secreția glandulară este influențată doar pe cale umorală și nu pe cale nervoasă vegetativă.

Dezvoltarea sistemului lobulo-alveolar ține de prezența estrogenilor, a progesteronului și a prolactinei, încât glanda mamară a femeii adulte negravidă poate secreta lapte după tratarea timp de două săptămâni cu estrogeni, ceea ce va determina secreția de prolactină și inițierea procesului secretor.

Modificările mamare din cursul sarcinii sunt atribuite secreției estrogenilor de la nivelul placentei, a căror acțiune pare a fi facilitată de secreția hormonului lactogen placentar, cât și a STH care, pe parcursul gestației, se secretă în cantități mai mari.

Sub influența în special a STH, celulele glandulare mamare vor primi o cantitate mai mare de aminoacizi și vor sintetiza mai multe proteine, explicând creșterea în dimensiuni a glandei.

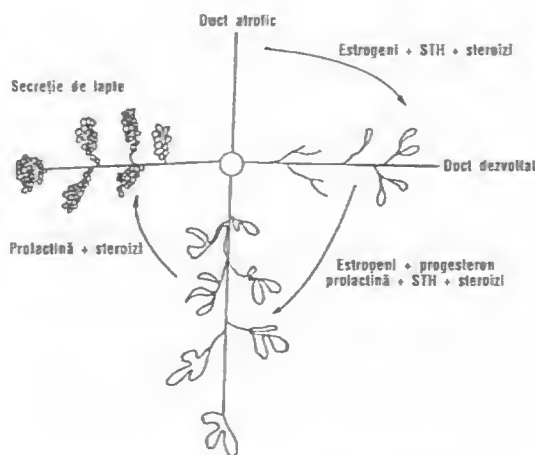


Fig. 15.14. Efectul hormonal asupra dezvoltării glandei mamare și a secreției lactate

Sub influența progesteronului se dezvoltă noi lobuli glandulari și este stimulată secreția celulelor alveolare, efect pe care-l realizează acest hormon și asupra celulelor endometriale.

După naștere, prolactină este hormonul care stimulează secreția laptelui la femeie, deși la animalele inferioare efectul este mai slab, influențând doar dezvoltarea morfologică glandulară.

Alături de prolactină mai intervin și alte secreții hormonale în vederea inițierii și menținerii unei secreții lactate corespunzătoare, cum ar fi tiroxina, steroizii corticopurarenali și insulina, influențând dezvoltarea glandelor mamare prin captarea de aminoacizi.

Pe culturi de țesut mamar s-a observat că acești hormoni produc diferențierea glandei și sinteza lactată (fig. 15.14).

Glandele mamare pregătite pentru secreția lactată încă din perioada finală a gestației vor elimina mici cantități de colostru în primele zile după naștere, secreție care conține proteine, Na^+ și Cl^- în proporție mai mare decât în secreția lactată; lipidele aproape că nu sunt prezente, iar K^+ și lactaza se găsesc mai puțin decât în lapte.

Estrogenii și progesteronul, a căror concentrație plasmatică la gravidă depășește cu mult valorile normale, constituie un factor frenator atât pentru eliberarea prolactinei din adenohipofiză, cât și pentru secreția lactată.

După naștere, când estrogenii și progesteronul placentar lipsesc, este posibilă eliberarea suficientă de prolactină și apariția lactogenezei (fig. 15.15).

Secreția acestui hormon hipofizar va duce la sinteza unor cantități crescute de lactază, cazeină și grăsimi de către celulele glandei mamare, determinând secreția laptelui după 3-4 zile de la naștere, mai ales că hormonul somatotrop și corticoizii au pregătit deja efectul prolactinei.

Sinteza și eliberarea prolactinei din adenohipofiză este controlată de către hipotalamus printr-un factor stimulator care ajunge în hipofiza anterioară pe calea sistemului vascular portal descris de Fielding-Popa. În același timp, hipotalamusul sintetizează și un factor inhibitor al secreției de prolactină, care în afara gravidității îi blochează formarea.

Experiențe pe animale au pus în evidență faptul că după secționarea legăturii vasculare hipotalamo-hipofizare toate secrețiile adenohipofizei se reduc, în timp ce secreția de prolactină este stimulată. Acest fapt demonstrează prezența și a altor mecanisme neuro-umorale care dirijează secreția prolactinică, în afara celor hipotalamo-hipofizare.

Lapte secretat în alveolele mamare va fi ejectat la exterior prin canalele glandulare datorită intervenției unui act reflex și a unui factor hormonal reprezentat de oxitocină. Sugerea mamelonului de către nou-născut va realiza după un interval de 30 s ejecția laptelui din alveole în canalele mamare, prin contracția celulelor mio-epiteliale ce le înconjură, ca răspuns la eliberarea, de la nivelul neurohipofizei, în circulația mamei, de oxitocină și vasopresină, proces comandat de hipotalamus, locul sintezei acestor hormoni.

Impulsurile senzoriale de la mamelon ajung la măduva spinării și, de aici, la hipotalamus, care comandă secreția și eliberarea de oxitocină, cu expulzia laptelui în ambii săni, deși se suge un singur mamelon. Ejectarea laptelui poate fi activată și de anumiți stimuli externi, cum ar fi plânsul copilului, în timp ce stimularea excesivă simpatică, emoțiile puternice pot inhiba ejectarea lactată. Se impune mamei un anumit microclimat, în vederea menținerii secreției și eliminării laptelui; după aproximativ 7-8 luni postnatal, secreția lactată poate fi blocată dacă spre hipotalamus nu mai pleacă stimuli de la nivelul mamelonului.

Sunt însă și situații în care factorul inhibitor al secreției de prolactină (PIF) de origine hipotalamică este blocat prin impulsurile venite de la zona mamelonară, ceea ce va determina secreția acestuia și continuarea eliminării laptelui.

Sinteza și secreția lactată la gravidă încep din a 5-a lună de sarcină, deși nu se manifestă. Nașterea stimulează mult secreția laptelui, pentru că nivelul estrogenilor și al progesteronului scade mult postnatal, în special după eliminarea placentei.

După naștere lipsește efectul estrogenilor și progesteronului, dar crește nivelul plasmatic al prolactinei și corticosteroizilor, ambii hormoni fiind considerați hormonii lactației. Ca și oxitocina, prolactina se eliberează din adenohipofiză sub influența impulsurilor plecate de la zona mamelonului excitat mecanic prin atingere sau prin actul sugerii. După două săptămâni de la naștere se constată un maximum de secreție lactată, iar ovariectomia nu oprește lactația. Sugerea sau stimularea mecanică a mamelonului pot induce

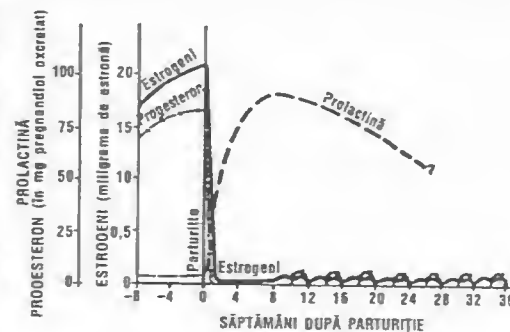


Fig. 15.15. Valorile prolactinei, estrogenilor și progesteronului pre- și postnatal.

secreția lactată și după instalarea menopauzei, cât și la bărbat. Lipsa secreției lactate în sarcină se explică prin acțiunea inhibitorie a estrogenilor, aflați în concentrație mare, asupra receptorilor pentru prolactina, prezenți în glanda mamară; scăderea concentrației estrogenilor în momentul nașterii explică exteriorizarea secreției lactate.

După naștere, uterul involuează mai repede la femeia care alăptează, probabil datorită reducerii secreției de estrogeni ovarieni din perioada alăptării, care, în mod normal, relaxează uterul. De asemenea, s-a constatat că la femeia care alăptează dimensiunile uterului se reduc după naștere, atingând valori mai mici decât în faza de pregestație, în timp ce, dacă secreția lactată nu se produce, uterul se va menține dilatat încă luni de zile după naștere.

În perioada alăptării, nu se mai constată ciclul ovarian, menstruațiile fiind blocate, deoarece hipotalamusul nu mai trimite suficienți factori eliberatori pentru gonadotrofine (FSH și LH).

După 1–5 luni de lactație, nivelul plasmatic al gonadotrofinelor hipofizare atinge valorile normale, ceea ce duce la maturarea foliculară, la ovulație, la formare de corp galben și, bineînțeles, la secreția de estrogeni și progesteron.

Apariția ciclului ovarian nu interesează secreția lactată.

Laptele de mamă aduce copilului un bogat conținut de lactoză, săruri minerale, vitamină D, imunoglobuline, grăsimi și mai puține proteine. Prin alăptare, copilul primește 2–3 g/zi de fosfat de calciu, atât de necesar edificării scheletului pe seama extragerii acestuia din oasele mamei de către parathormonul secretat în exces în cursul alăptării.

Pentru copil, laptele matern rezolvă nutriția și protecția imunologică, mai ales că în perioada de nou-născut sistemul său imunitar este incomplet dezvoltat.

Copiii alăptați la sân se dezvoltă armonios, fiind în afara pericolului infecțiilor măcar pentru primele 6 luni de viață, când apărarea imunitară este transmisă prin alăptare de la mamă.

16. PARTICULARITĂȚI FUNCȚIONALE ALE COPILĂRIEI

Copilăria este reprezentată de perioada de creștere și dezvoltare progresivă a copilului de la naștere și până la adolescență. În funcție de vârstă și gradul de dezvoltare, copilăria parcurge mai multe perioade. Prima perioadă, cuprinsă între naștere și primii 3 ani de viață, poartă denumirea de prima copilărie. Aceasta este urmată de copilăria a II-a (preșcolară), care corespunde vârstei de 3–6 ani. Urmează copilăria a III-a (școlară), cu durată variabilă, de la vârsta de 6 ani până la sfârșitul pubertății.

La rândul său, prima copilărie este divizată cronologic în perioadele de: nou-născut (1–28 de zile), sugar (1 lună–1 an) și de copil mic (1–3 ani). Primele 7 zile reprezintă perioada perinatală, iar perioada de copil mic marchează sfârșitul primei copilării și încheierea erupției dinților de lapte.

Fiecare din aceste perioade prezintă anumite particularități morfo-funcționale, ce vor fi succint prezentate.

16.1. PERIOADA DE NOU-NĂSCUT

Perioada de nou-născut cuprinde primele 28 de zile de viață, în care are loc trecerea și adaptarea de la viața intrauterină la cea extrauterină. Trecând de la o viață parazită la autonomie fiziologică, nașterea produce întreruperea circulației placentare și intrarea în funcție a diverselor aparate și sisteme proprii (circulator, respirator, digestiv, excretor, senzorial, termoreglator, imunitar etc.). Solicitățile mari postnatale ale unui organism cu posibilități funcționale limitate determină o serie de manifestări caracteristice nou-născutului, ca: scăderea în greutate, icterul neonatal, denumit și fiziologic, și criza hormonală.

Scăderea în greutate reprezintă 5–10% din greutatea inițială. Ea este determinată de pierderile de lichide prin urină, meconiu și perspirație insensibilă, necompensate în primele zile de aportul alimentar.

Revenirea la greutatea inițială are loc după 7–8 zile și este urmată de un ritm accelerat de creștere ponderală, staturală și a perimetrului cranian.

Icterul neonatal – fiziologic – are o incidență medie de 30% în cazul nou-născutului la termen. El se datorește hiperbilirubinemiei realizate de hemoliza exagerată a eritrocitelor și metabolizarea defectuoasă a bilirubinei.

Criza hormonală sau genitală se manifestă sub formă de tumefiere a glandelor mamare și de edemajiere a organelor genitale externe la ambele sexe. Ea este atribuită gonadotrofinelor și hormonilor gonadali materni pătrunși în circulația nou-născutului în cursul contracțiilor uterine la naștere.

O mare parte din celelalte caracteristici somatice, vegetative și metabolice ale perioadei neonatale, fiind deja prezentate într-unul din subcapitolele anterioare (a se vedea subcapitolul 15.3), în cele ce urmează vor fi menționate doar principalele particularități morfo-funcționale ale nou-născutului.

Pe plan somatic, nou-născutul la termen (42 de săptămâni = 290 de zile) are greutatea medie de 3 200 g, cu variații între 2 800–4 500 g. Lungimea corpului la naștere variază între 48 și 54 cm. Capul reprezintă 1/4 din lungime, iar circumferința craniană este de 34–35 cm. Abdomenul este globulos, organele genitale externe prezintă la băieți testiculele coborâte în scrot sau se palpează în canalele inghino-scrotale, în timp ce la fete vulva este închisă.

Pielea este acoperită la naștere de un înveliș cremos, denumit vernix caseosa, de culoare alb-gălbui. secretat de glandele sebacee, cu rol emolient și protector.

Suprafața cutanată a nou-născutului este de 0,179 m², glandele sebacee sunt bine dezvoltate, iar pH-ul pielii este neutru. Țesutul celular subcutanat este bogat în grăsimi brune, acizi stearici și palmitici, cu punct de fuziune ridicat. Masa musculară reprezintă 22% din greutatea corporală, în timp ce musculatura cefei este hipotonă, mușchii membrelor prezintă un oarecare grad de hipertonicitate, cu predominanța flexiei.

Procesul de osificare, început în luna a 5-a de gestație la nivelul claviculelor și oaselor craniene, apare evident la naștere în diafiză și în câțiva nuclei epifizari (tibia, femur). După declanșarea primei respirații prin mecanismul complex anterior descris, respirația este neregulată și tahipneică în primele 60 de minute, cu secreție bucală spumoasă și raluri bronșice determinate de eliminarea resturilor lichidiene existente în plămânul fetal.

În continuare, ritmul respirator se stabilizează la o frecvență de 30–50 de respirații pe minut. Respirația este diafragmatică sau abdominală, cu posibile crize de apnee de 5–20 de secunde. Saturarea cu oxigen a hemoglobinei crește la nou-născuți de la 60%, în momentul nașterii, la 95%, în următoarele 3–4 ore.

Posibilitățile de digestie fiind limitate de lipsa amilazei și de activitatea redusă a lipazei pancreatice, alimentația este exclusiv lăctată. Digestia lipidelor din lapte este asigurată în proporție de peste 30% de către lipaza linguală și gastrică.

Tractul digestiv fiind steril la făt, popularea microbiană a acestuia se realizează pe cale descendentă, favorizată fiind de aciditatea gastrică redusă și de deficitul sărurilor biliare, ca factori de activare și multiplicare a florei microbiene.

Adaptarea cardio-vasculară postnatală fiind de asemenea descrisă anterior, menționăm doar că frecvența cardiacă oscilează între 140–160 de contracții/minut și că electrocardiograma prezintă în primele zile axa electrică deviată la dreapta, voltajul complexelor ventriculare mici și unda T inversată.

Destinderea plămânilor în cursul aerării lor produce torsionarea cordului, iar suprimarea barajului pulmonar este urmată de creșterea presiunii în cavitățile cardiace stângi și aortă, realizând închiderea canalului arterial și valori presionale superioare celor din cavitățile drepte. Atât tahicardia neonatală, cât și presiunea arterială sistolo-diastolică (cu valorile sale normale de 65–70/40–45 mmHg) cresc în timpul plânsului și suptului și diminuează în somn.

Funcția excretorie renală depinde de nivelul presiunii sistemice, rezistența vasculară renală, fluxul sanguin renal și aportul de lichide. Dacă în primele 2–3 zile după naștere debitul filtrării glomerulare este redus, datorită ratei de filtrare de doar 2,5 ml/min, la 2 săptămâni acesta se dublează. Astfel, diureza crește, de la valoarea medie de 20 ml/kg/zi, până la 75 ml/kg/zi.

Osmolaritatea urinei se situează între 100 și 200 mOsm/kg la nou-născut, a cărui capacitate de concentrație este limitată atât de scurtimea ansei Henle, cât și de deficitul de ADH hipofizar.

Densitatea urinei este de 1 004–1 006, cu variații în funcție de aportul lichidian. Datorită imaturității funcțiilor tubulare, reabsorbția bicarbonatului și răspunsul rinichiului la încălcarea acidă sunt mai slabe. O hiperuricemie tranzitorie apare ca urmare a hemolizei postnatale.

Numărul micțiunilor este de 5–6 pe zi, iar volumul urinei variază între 4–6 ml/kg la fiecare micțiune. Actul reflex al micțiunii se realizează pe cale parasimpatică, cu participarea centrilor medulari sacrați (S₂–S₄).

Volumul sanguin este în medie de 95 ml/kg corp la nou-născutul la termen. Trecerea de la starea de bipoxie intrauterină la ameliorarea oxigenării în urma respirației pulmonare determină fenomene de adaptare și pe plan hematologic. Atât numărul de eritrocite (5–6 milioane/mm³), cât și hematocritul (55%) și hemoglobina (20 g/dl), crescute la naștere, scad în zilele următoare, apropiindu-se de valorile normale. Aceeași tendință are loc în cazul leucocitelor și trombocitelor. Hemostaza este deficitară la naștere, datorită imaturității funcționale hepatice și insuficienței nora din factorii plasmatici ai coagulării. Apărarea imunitară este limitată de imunoglobulinele transmise transplacentar sau prin laptele matern.

Funcțiile sistemului nervos sunt dominate la naștere de activitatea reflexă bulbo-spinală, fără activitate voluntară și inhibiție corticală.

Scoarța cerebrală, fasciculul piramidal, căile extrapiramidale, nucleii subcorticali și nervii cranieni fiind la începutul mielinizării, nou-născutul prezintă reflexe osteo-tendinoase mai ample și reflexul Babinski pozitiv în flexie dorsală. Hiperexcitabilitatea neuro-musculară se însoțește de mișcări anarhice și de prezența reflexelor arhaice (Moro – de îmbrățișare, Peiper – de extensie a capului, de incurbare laterală

a trunchiului, de alungire încrucișată a membrelor inferioare etc.), care semnifică integritatea centrilor subcortico-spinali.

Electroencefalograma înregistrează la nou-născut trasee bioelectrice neregulate, de amplitudine mică (20–40 mV), fără diferențe semnificative între traseul de veghe și somn. Perioada de veghe este scurtă și greu de delimitat, deoarece nou-născutul ține pleoapele închise și în timp ce este treaz. Trezirea este legată de senzația de foame. Somnul prezintă faze de somn liniștit, cu puls și respirație regulate, alternând cu faze de somn agitat, cu mișcări de sugere, de deglutiție și zămbet.

Retina nou-născutului este incomplet dezvoltată, iar nervul optic parțial mielinizat. Nou-născutul vede, reacționează la lumină, dar nu distinge vederea cromatică. Mișcările ochilor sunt neordonate pe fondul unui strabism tranzitor convergent.

Auzul este prezent la naștere, putându-se evidenția prin reflexul acustico-palpebral produs de stimulii auditivi puternici. Sensibilitățile gustativă, olfactivă și tactilă sunt prezente la naștere, iar căile și centrii acestora se mielinizează printre primii. Datorită imaturității centrilor termoregulatori, nou-născutul prezintă un oarecare grad de instabilitate termică dependentă de confortul termic ambiant. Aceasta este consecința termogenezei limitate și a termolizei exagerate.

Cât privește alimentația nou-născutului, laptele de mamă asigură posibilități optime de adaptare la viața extruterină. Acesta este steril, satisface nevoile nutritive și posibilitățile de digestie ale nou-născutului, asigurând dezvoltarea normală și creșterea rezistenței la infecții.

16.2. SUGARUL ȘI COPILUL

Sugarul și copilul reprezintă etapele următoare ale dezvoltării nou-născutului. Ele se particularizează prin continuarea, odată cu înaintarea în vârstă, a proceselor de creștere și dezvoltare armonioasă atât pe plan somatic, cât și din punct de vedere comportamental și neuro-psihic.

Pe plan somatic, osificarea scheletului se realizează într-o anumită succesiune, începând cu cei câțiva nuclei cranieni și epifizari de la naștere și continuând cu calcificarea progresivă a tuturor oaselor, până la vârsta de 6 ani. În perioada de creștere, activitatea osteoblastelor predomină asupra osteoclastelor, iar la maturitate apare echilibrul lor. La sfârșitul pubertății are loc calcificarea cartilajelor de creștere epifizo-diafizare. Cutia craniană prezintă sinostozarea oaselor calotei după încetarea creșterii și dezvoltării țesutului nervos cerebral. Oasele calotei fiind subțiri la sugar, diploia este flexibilă, generând deformări (scafocefalie), datorită poziției de decubit. Fontanela posterioară se închide în primele 2 luni, iar cea anterioară la 18 luni.

Coloana vertebrală suferă incurbări sub acțiunea forțelor mecanice. La vârsta de 3 luni, când sugarul ridică capul, se dezvoltă lordoza cervicală. La 6 luni apare cifoză dorsală, odată cu statul în șezut. La 9–12 luni, când sugarul începe să meargă, se dezvoltă lordoza lombară. Curburile coloanei vertebrale se accentuează în al doilea an de viață.

Toracele își păstrează forma cilindrică până la vârsta de 6 luni, după care ia forma de con, iar coastele coboară și devin oblice. Scheletul bazinului își păstrează forma de pălnie la băieți, în timp ce la fete, odată cu pubertatea, devine cilindric.

Membrele inferioare cresc, mai repede decât cele superioare. Substanța osoasă se condensează de-a lungul liniilor de forță, sub acțiunea factorilor mecanici.

Sistemul muscular crește de la 22% la 33–36% din masa corporală în cursul copilăriei, predominând la membrele inferioare.

Hipertonia musculară a nou-născutului este urmată de tendința la normotonie după vârsta de 2–3 luni, ca urmare a dezvoltării postnatale nervoase.

Cu toate acestea, tonusul flexorilor rămâne superior tonusului extensorilor în tot cursul copilăriei. Dezvoltarea țesutului celular subcutanat apare mai întâi la față, apoi la membre și torace, pentru ca după primele 6 săptămâni să fie evidentă și pe abdomen.

Turgorul, reprezentat de consistența fermă și elasticitatea pliului cutanat la sugar, este dat de compoziția chimică a țesutului celular subcutanat (bogat în acid palmitic), de hidratarea coloizilor celulari, precum și de starea colagenului și a fibrelor elastice. El apare diminuat în malnutriție și devine păstos la sugarii alimentați cu exces de făinoase.

Începând cu al doilea an de viață, conținutul în lipide de rezervă diminuează până la vârsta de 6-8 ani, grosimea pliului cutanat fiind doar de 1/2 față de cea de la vârsta de 1 an. La pubertate are loc o diferențiere pe sexe a distribuției țesutului adipos: la băieți predomină în partea superioară a corpului, iar la fete în jumătatea inferioară. Față de masa corporală, suprafața cutanată este mare (19%) la sugar și copil, comparativ cu adultul (10%).

Tegumentele prezintă îngroșarea straturilor cornos în perioada de sugar, însoțită de scăderea permeabilității și creșterea rezistenței la agenții fizico-chimici. Glandele sebacee sunt bine reprezentate, secreția bogată a acestora producând seboreea pielii capului. Glandele sudoripare se dezvoltă mai lent, devenind secretoare după vârsta de 2-3 luni.

Dezvoltarea aparatului respirator prezintă o serie de particularități legate de vârstă, începând cu căile respiratorii superioare și sfârșind cu teritoriul alveolo-capilar pulmonar.

Sinusurile feței sunt mici la sugar și se dezvoltă inegal, cu evoluție mai lentă (până la vârsta de 6 ani) în cazul sinusului frontal.

Faringele prezintă cercul limfatic Waldeyer hipertrofiat până la vârsta de 6 ani, pentru ca la pubertate să înceapă involuția fiziologică a acestuia, odată cu cea a întregului țesut limfoid. Laringele are o poziție înaltă la copil și o dezvoltare rapidă la pubertate, care schimbă timbrul vocii. Coborârea coastelor și a diafragmului, urmată de creșterea diametrului longitudinal și a celui transversal al cutiei toracice determină trecerea de la respirația de tip abdominal la respirația toracică.

La rândul lor, aerarea plămânilor și creșterea fluxului sanguin pulmonar duc la mărirea volumului și suprafeței respiratorii. Elasticitatea pulmonară crește până la vârsta de 20 de ani, mărind complianța plămânilor. Caracterul superficial al respirației sugarului este compensat prin frecvența mai mare a acesteia. Volumul aerului respirator crește cu vârsta, de la 15 cm³, la 350-360 cm³ la pubertate.

Debitul ventilator, de asemenea, crește de la 550 cm³ la naștere, până la 4 500 cm³ la 15 ani. Frecvența respiratorie scade cu vârsta, de la 30 de respirații/min la sugar, la 16 respirații/min la 15 ani.

Cordul, orizontalizat la sugar, se verticalizează cu vârsta, ajungând la 2 ani cu apexul în spațiul V intercostal pe linia mamelonară. Frecvența bătailor cardiace descrește cu vârsta, de la 150 de băți pe minut la vârsta de 1 lună, la 120 de băți pe minut la 1 an și la 85 de băți pe minut la pubertate. Ritmul sinusal prezintă mari variații în primele săptămâni de viață. O aritmie respiratorie poate apărea fiind reprezentată de accelerarea pulsului în inspirație, urmată de rărire în timpul expirului.

Electrocardiograma prezintă unda T inversată în V₁-V₄ și axa electrică verticală după vârsta de 1 an. Echocardiograma evidențiază mărirea dimensiunilor cordului în raport cu vârsta copilului.

Presiunea arterială crește de la naștere și până la 20 de ani, cu aproximativ 2 mmHg pe an de vârstă în cazul presiunii sistolice și cu 0,5-1 mmHg pe an în cazul presiunii diastolice.

Tensiunea arterială sistolică a copilului se poate calcula după formula lui Kazemborg: $T = 80 + 2A$ (vârsta în ani) ± 10 mmHg.

Volumul sanguin diminuează postnatal, atingând valorile adultului, de 75-80 ml/kg/zi, la vârsta de 2-3 luni.

Hematopoieza la copil are loc în măduva osoasă, pentru seriile eritrocitară, granulocitară și trombocitară, iar cea limfocitară - în organele limfatice și măduvă. După vârsta de 6 luni, măduva hematogenă din diafize se transformă în măduvă grăsoasă, cu păstrarea potențialului hematopoietic.

În sângele periferic au loc, de asemenea, modificări importante odată cu înaintarea în vârstă a copilului.

Eritrocitele își micșorează diametrul și volumul, concomitent cu creșterea duratei lor de viață.

Numărul hematiilor scade la 5 milioane/mm³ la băieți și la 4,5 milioane/mm³ la fete în perioada pubertară. Hemoglobina diminuează la 11 g/dl în primii 2 ani, apoi crește progresiv până la vârsta de 14 ani, ajungând la 16 g/dl la băieți și 14 g/dl la fete.

Numărul leucocitelor scade lent până la vârsta de 4 ani, când acestea ating valorile definitive, de 7 000-8 000/mm³. În formula leucocitară apare neutropenie de 30%, însoțită de limfocitoză, până la vârsta

de 4 ani. Formula leucocitară a adultului apare la 5-6 ani ai copilului. Trombocitele și factorii de coagulare se normalizează însă rapid după naștere.

Funcția digestivă prezintă fenomene de adaptare mecanică și chimică, corespunzătoare necesităților copilului impuse de vârstă. Dentiția de lapte sau temporară cuprinde 20 de dinți, ai căror muguri apar în perioada intrauterină. Erupția dinților de lapte are loc la vârsta de 6-8 luni în cazul incisivilor mediani inferiori, la 8-10 luni erup incisivi mediani superiori, la 10-12 luni incisivi laterali, la 18 luni primii molari superiori și inferiori, la 2 ani caninii, iar între 2½-3 ani erupe a doua pereche de molari. Erupția dentară se poate însoți de sialoree, tumefierea mucoasei gingivale, ușoară indispoziție și insomnie. Concomitent se produc dezvoltarea musculaturii masticatorii și trecerea la alimentația diversificată.

Dentiția definitivă începe la 6-7 ani și este formată din 32 de dinți. La 7-8 ani erup incisivi mediani și laterali, la 9-10 ani premolari, la 11-12 ani caninii și ultimii premolari, la 13-14 ani primii molari și până la 18 ani apar ultimii molari (măselele de minte).

În condițiile deficitului fiziologic al amilazei pancreatice, amilaza salivară asigură la sugar hidroliza amidonului. La rândul său, lipaza linguală participă la digestia lipidelor din lapte, împreună cu lipaza gastrică. Stomacul, fiind dispus transversal la sugar, se verticalizează după vârsta de 2 ani, pentru ca după 7 ani să ia forma de cârlig.

Secreția de gastrină și HCl crește, iar pH-ul sucului gastric coboară progresiv la 2,5-3,5 la sugarul alimentat natural.

Labfermentul are o activitate crescută în perioada de alăptare, în timp ce pepsinogenul atinge valorile de la adult la vârsta de 2 ani.

Activitatea motorie a stomacului prezintă particularități legate de felul alimentației și vârstă. În cursul alimentației lactate, stomacul se umple ca un recipient, iar evacuarea se realizează prin contracția întregii musculaturii gastrice, urmată de deschiderea rîmnică a pilorului. Tonusul redus al cardiei favorizează regurgitația și vărsătura, ce pot fi prevenite prin poziția verticală a sugarului după alimentare. După diversificarea alimentației, ca și la copilul mare, evacuarea conținutului gastric se face prin mișcări peristaltice, urmate de deschiderea pilorului.

Intestinul copilului este mai lung decât al adultului, dacă este raportat la lungimea corporală. Raportul dintre lungimea intestinului și a corpului scade progresiv, în funcție de vârstă. Vîlozitățile intestinale și glandele Lieberkühn se dezvoltă odată cu vârsta copilului. Secreția enzimatică crește paralel cu maturația morfologică a intestinului.

Activitatea enterokinazei crește de 4 ori la vârsta de 1 an și de 7 ori la vârsta de 4 ani, determinând activarea tripsinogenului și formarea de tripsină în cantități crescânde.

Amilaza și lipaza pancreatică sunt potențate la sugar de sursele salivare și gastrice, a căror activitate enzimatică este favorizată de pH-ul local.

În timp ce activitatea fermenteilor proteolitici pancreatici (tripsina și chimotripsina) este normală încă din prima lună de viață, lipaza și amilaza pancreatică se normalizează de abia la vârsta de 2 ani.

Absorbția este deplină de la naștere, atât în cazul aminoacizilor și acizilor grași, cât și al monozaharidelor.

Ficatul își mărește greutatea de 10 ori până la pubertate. Conținutul în glicogen al ficatului crește, de asemenea, cu vârsta. Funcția antitoxică a acestuia este însă deficitară la sugar, iar secreția biliară mai redusă.

Rinichii se dezvoltă rapid în primul an de viață, prezentând o creștere prioritară a zonei corticale, însoțită de îmbunătățirea corespunzătoare a filtrării glomerulare. Capacitatea de diluție și concentrare a urinei este însă limitată în primele 6 luni. Eliminarea uricii depinde de aportul de proteine, iar cea a acidului uric scade cu vârsta, rămânând însă superioară față de adult. Excreția creatininei crește de la 20 mg/kg/zi, la vârsta de 2 ani, până la 30-40 mg/kg/zi, la pubertate. Eliminarea bicarbonaților se realizează la un prag renal mai mic de 22 mOsm/l la sugari, comparativ cu adultul, la care pragul de eliminare variază între 24 și 26 mOsm/l.

Urina sugarului alimentat natural are un pH de 6,8-7,8, contrar celui alimentat artificial, cu pH urinar doar de 5.

Diureza este de 75-100 ml/kg/zi la sugar, atingând 250-750 ml/zi. Până la vârsta de 10 ani variază între 600 și 1 200 ml/zi, pentru ca, ulterior, să ajungă la 1 000-1 500 ml/zi.

Densitatea urinei este de 1 010–1 012 la sugar și 1 015 la copil. Golirea vezicii se realizează prin mecanism reflex la sugar, întregit de componenta voluntară după vârsta de 1–2 ani, când copilul percepe nevoia de evacuare a vezicii.

Frecvența micțiunilor este de 8–15 ori pe zi în perioada de sugar și scade la 6–8 pe zi după ce se realizează controlul voluntar al vezicii.

Aparatul genital se dezvoltă lent până la pubertate. La fete, ovarele încep să crească de la vârsta de 8 ani, atingând maximum la 13–15 ani. Uterul crește după 12 ani până la 18 ani. Examenul citohormonal evidențiază, la pubertate, prezența celulelor acidofile secretoare în locul bazofililor predominante până la apariția ciclului menstrual. Menarha este precedată de leucoree.

La băieți, testiculele cresc, de asemenea, lent până la vârsta de 10–11 ani, când apar primele mitoze în celulele germinale, cu formarea de spermatoците și spermatoide. La 15–16 ani se dezvoltă spermatogeneza și se maturează celulele Leydig secretoare de hormoni testiculari.

Odată cu maturarea gonadelor se dezvoltă caracterele sexuale secundare și funcția de reproducere. Vârsta apariției pubertății prezintă variații individuale și familiale, legate de alimentație, climă și factori ambientali. Dacă în secolul trecut vârsta instalării pubertății la fete era de 16–17 ani, în prezent a coborât la 12–14 ani, datorită factorilor economico-sociali. La băieți, pubertatea apare la 13–15 ani. Pubertatea durează 3–4 ani și cuprinde următoarele etape:

- etapa prepubertară este dominată de secreția hormonului somatotrop ca factor de stimulare a creșterii generale și a saltului statural evident;
- etapa de debut a pubertății, în care au loc maturarea organelor genitale și secreția hormonilor gonadali, stimulate de creșterea secreției de gonadotrofine hipofizare.

Sub influența hormonilor gonadotropi și gonadali apar caracterele sexuale secundare specifice sexului. La fete începe dezvoltarea sânilor (telarha), însoțită de prezența pilozității pubiene și axilare. Telarha precede menarha (prima menstruație).

La băieți, debutul pubertății este marcat de apariția pilozității pubiene, axilare și faciale, dezvoltarea musculaturii scapulare și schimbarea vocii;

- etapa postpubertară corespunzătoare adolescenței durează până la calcifierea cartilajelor de creștere sub influența hormonilor gonadotropi gonadali și tiroidieni, ca factori de desăvârșire a maturizării organelor sexuale și a dezvoltării neuro-psihoice. Pubertatea poate fi precoce ori tardivă, de origine hipotalamo-hipofizară sau gonadică, cu repercusiuni de diferite grade asupra comportamentului sexual și fertilității individului.

Creierul crește într-un ritm constant, atingând la vârsta de 8 ani 95% din greutatea sa finală. Scizurile și circumvoluțiunile se accentuează în primul an de viață. Mielinizarea căilor eferente are loc în același ritm cu al căilor aferente.

Controlul cortical asupra structurilor subcorticeale este slab la sugar. La vârsta de 6 luni scoarța controlează postura, la 9 luni motricitatea voluntară, la 1 an limbajul, iar la 2 ani controlul cortical se exercită asupra tuturor funcțiilor.

Electroencefalograma nu prezintă elemente de diferențiere între diversele regiuni corticale în primele 3 luni de viață. Ulterior, apare organizarea topografică a activității electrice, mai întâi în zona occipitală și apoi în cele două emisfere cerebrale. Până la vârsta de 18 luni predomină undele delta. După 2 ani apar undele teta și ritmul alfa dominant în perioada copilăriei.

În prima copilărie predomină dezvoltarea și adaptarea senzorială, indispensabilă funcției de percepție și cunoaștere. Aceasta este întregită de dezvoltarea motorie și a limbajului, ca urmare a dezvoltării sistemelor nervos, muscular și osos.

Dezvoltarea psiho-afectivă a copilului este puternic marcată de interacțiunile cu mediul familial și social.

Aprecierea dezvoltării neuro-psihoice a copilului se poate realiza cu ajutorul „baby testelor” ce utilizează ca repere ale dezvoltării motricitatea, limbajul, comportamentul senzorial și social în funcție de vârstă, la sugar și copilul mic, sau determinând coeficientul de inteligență (QI) și diversele reacții psiho-senzoriale și psiho-motorii în cazul perioadelor a II-a și a III-a ale copilăriei.

Apărarea antiinfecțioasă cunoaște o rapidă dezvoltare postnatală la toate nivelurile. Bariera mecanică naturală oferită de piele și mucoase apare evidentă încă din perioada de sugar.

Imunitatea specifică celulară prezintă o creștere progresivă până la vârsta de 12 ani, după care diminuează. Timusul crește în greutate până la pubertate, iar plăcile Payer cresc numeric până la 20 de ani. Pe de altă parte, imunitatea umorală se dezvoltă după naștere. Sinteza de imunoglobuline G începe la vârsta de 6–7 săptămâni și prezintă o creștere progresivă până la 1 an, când atinge valorile adultului.

Imunoglobulinele M și A se sintetizează de la vârsta de 5–6 zile și cresc lent până la pubertate. Astfel, copilul, deși primește imunoglobuline prin laptele de mamă, se înarmează cu întregul dispozitiv de apărare antiinfecțioasă specifică și nespecifică încă din perioada de sugar.

17. FIZIOLOGIA SENESCENTEI

Motto:

Din momentul în care ne naștem, timpul începe să ne ia viața înapoi.

(Seneca)

17.1. DATE GENERALE

Vârsta, ca durată a vieții, reprezintă timpul scurs de la naștere și până la o anumită etapă a existenței sau până la moarte. Ea prezintă o serie de particularități biologice, psihologice și mentale, specifice etapelor evolutive ale vieții, a căror cunoaștere este indispensabilă diferențierii normalului de patologic.

Prelungirea duratei medii de viață din ultimele decenii, însoțită de creșterea numărului de persoane a căror vârstă depășește 60 de ani, ridică o gamă variată de probleme specifice atât de sanogenetă, cât și de patogeneză a omului vârstnic. Dacă la începutul erei creștine vârsta medie la moarte varia, în lipsa mijloacelor de protecție sanitară, socială și tehnologică, în jurul a 30 de ani, la începutul secolului nostru aceasta era de 45-50 de ani, pentru ca spre sfârșitul lui să depășească 70 de ani (fig. 17.1).

În decursul actualului secol, omenirea a parcurs trei principale etape pe plan de morbiditate și de asistență sanitară. După o primă etapă dominată de boli infecțioase (tuberculoză, variolă, difterie, febră tifoidă etc.), a urmat etapa bolilor cronice (ateroscleroză, diabet, cancer etc.), care face loc actualmente celei de a treia etapă, reprezentată de tendința la creștere a duratei medii de viață. În 1985, ponderea populației de peste 60 de ani era de 16,2% în America de Nord și de 17,6% în Europa. În România, îmbătrânirea demografică s-a accentuat după cel de al doilea război, deși prezintă o evidentă întârziere față de țările din apusul Europei. Ea a crescut de la 6,9% în 1930, la 15,6% în 1990.

Fenomenul îmbătrânirii demografice, fiind dependent de nivelul dezvoltării social-economice, va atinge indici de îmbătrânire de peste 20% în țările avansate până în anul 2000. În țara noastră se estimează că ponderea populației vârstnice va ajunge în anul 2000 la aproximativ 18%, iar durata medie de viață va fi de 70,3 ani. Ponderea crescândă a populației vârstnice impune cunoașterea particularităților funcționale ale senescenței fiziologice.

Senescența, ca proces biologic de îmbătrânire (de la latinescul *senescere* = a îmbătrâni), poate fi definită drept suma tuturor modificărilor (schimbărilor) morfo-funcționale cumulate în timp și care duc, în cele din urmă, la fenomene involutive de uzură, deteriorare și degradare progresivă, incompatibile cu viața. Spre deosebire de alterările generate de stări patologice, denumite procese patogene, cele realizate de senescență *per se*, în afara stării de boală, poartă denumirea de procese eugenice.

La rândul său, bătrânețea, ca stadiu evolutiv de vârstă, reprezintă ultima etapă a ontogenezei (vârsta a treia), cu

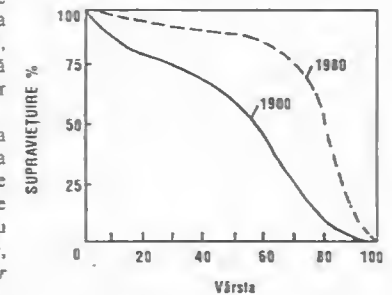


Fig. 17.1. Modificările curbei de supraviețuire în ultimii 80 de ani.

fiziologie proprie. În funcție de numărul anilor, OMS împarte persoanele aparținând vârstei a treia în vârstnici (60–75 de ani), bătrâni (76–90 de ani) și foarte bătrâni (peste 90 de ani).

În general, procesele euerice de îmbătrânire afectează în mod diferit structura și funcțiile diverselor țesuturi și organe. În timp ce funcțiile de „rezervă” și masa tisulară activă se reduc progresiv, funcțiile vitale persistă. Alterările survenite privesc fie degradarea unor structuri anatomiche însoțită de supraviețuirea altora prevăzute cu o activitate compensatoare, ca în cazul nefronilor sau al fibrelor musculare, fie pierderea continuă de neuroni, urmată de scăderea progresivă a performanțelor senzitivo-senzoriale și comportamentale.

La baza lor stau perturbări biochimice celulare generate de procesele de uzură și alterare a reacțiilor adaptative generale și locale agresionate timp îndelungat de solicitările variabile ale mediului extern ostil.

17.2. ASPECTE CELULARE ALE ÎMBĂTRÂNIRII

La nivel celular, procesele de senescență se caracterizează prin aglutinarea cromatinei în nucleu, invaginarea membranei nucleare, creșterea numărului de nucleoli și reducerea reticulului endoplasmatic rugos, însoțite de scăderea sintezei proteice. Un rol determinant deține reducerea numărului, mării și activității oxido-reductoare a mitocondriilor, dublată de creșterea conținutului celular în granule pigmentare de lipofuscină. Acumularea progresivă a acesteia este urmată de reducerea volumului citoplasmatic și deprimarea proceselor plastice și energetice celulare.

Fibroblastele umane, de exemplu, preluate de la persoane vârstnice și cultivate *in vitro*, prezintă un număr mult mai limitat de diviziuni celulare decât cele recoltate de la tineri. Conținutul acestora în 5'-nucleotidază și cGMP crește odată cu vârsta, în timp ce cAMP scade. Modificarea raportului existent între cAMP și cGMP pare a fi unul din indicii metabolici de îmbătrânire la nivel celular.

Printre alterările celulare produse de senescență figurează și cele de la nivelul sistemului limfoid, implicat în reacțiile de apărare imunitară. Îmbătrânirea se însoțește de fenomene de imunodeficiență, ca urmare atât a involuției timice și reducerii numărului și activității limfocitelor T indispensabile imunității celulare, cât și a formării de autoanticorpi și țesut amiloid din lanțurile ușoare ale imunoglobulinelor.

Din exemplele date rezultă că îmbătrânirea nu are o cauză unică. Diferențierea structurală, metabolică și funcțională celulară este dublată de procese de îmbătrânire, diferențiată la nivel celular și tisular, ale căror intensitate și convergență duc cu timpul la disfuncție terminală.

17.2.1. TEORII PRIVIND ÎMBĂTRÂNIREA BIOLOGICĂ

Dintre numeroasele teorii (autoimună, mutației somatice, erorii genice, radicalilor liberi etc.) care încearcă să explice mecanismul de producere a fenomenului complex de îmbătrânire celulară, vor fi menționate doar ultimele două. Prima, cunoscută sub denumirea de *teoria erorii genice*, se referă la alterarea sintezei proteice, ca urmare a defectelor survenite la nivelul genomului în transcripția informației de la ADN nuclear la ARN în moleculele de protein-enzime nou-formate. Conform ipotezei genelor determinante ale longevității (Cutler, 1982), îmbătrânirea este rezultatul efectelor secundare ale proceselor energo-metabolice normale din timpul vieții. Acestea determină schimbări calitative ale expresiei genice, care duc la alterarea urmată de pierderea stabilității reacțiilor enzimato-chimice de diferențiere și dezvoltare celulară. Rezistența acestora la căldură, de exemplu, este mai redusă în cazul persoanelor vârstnice decât a enzimelor recoltate de la tineri. Dacă este vorba de o eroare a sintezei proteice sau de modificarea conformației structurale a unor proteo-enzime celulare implicate în mutațiile somatice rămâne de stabilit. Sigur pare a fi pierderea controlului genic corect, indispensabil proceselor de diferențiere normală generatoare a fenomenului de moarte celulară programată, denumit apoptoză.

Apoptoză este fenomenul natural de suicid celular determinat genetic ca urmare a degradării progresive a segmentului terminal al ADN, denumit telomer, de către enzima telomereză, până la un punct care duce la incapacitatea acizilor nucleici de a realiza sinteza de noi proteine. Spre deosebire de necroză,

care este o moarte celulară intempestivă, accidentală, produsă de o leziune chimică sau fizică, apoptoză reprezintă o modalitate fiziologică de moarte celulară programată genetic, generatoare de autodistrugere ireversibilă. Ea poate fi activată de unele substanțe celulare sau de o serie de procese supraadăugate de natură inflamatorie sau degenerativă, tumorală.

Modificările celulare normale sau patologice produse de apoptoză predomină la nivel nuclear și mitocondrial, având la bază activarea caspazelor de către radicalii liberi ai oxigenului și azotului.

Caspazele, în număr de cel puțin 11, sunt cistein proteaze celulare modulate atât în sens activator de către stresul oxidativ, cât și în sens inhibitor, de oxidul nitric și proteinele nitrizate ale stresului nitrozativ. Stresul oxidativ intensificând la vârstnici (până la 30%) oxidarea proteinelor, lipidelor și glucidelor celulare favorizează activitatea caspazelor și genelor oncogene (p53, ced-3 și ced-4) inductoare de fenomene apoptotice. La rândul lor, genele oncogene bel-2 inhibă apoptoză. Pe plan morfo-chimic, moartea prin apoptoză determină ratatinarea și fragmentarea nucleului, cariolică și cromatolică însoțite atât de condensarea cromatinei nucleare sub formă de corpi apoptotici, cât și de alterări ale membranelor mitocondriale. În cazul morții prin necroză accidentală apar fenomene inverse, de gonflare edematoasă și liză de tip inflamator produse de distrugerea membranelor și organelor celulare, urmate de alterarea cromatinei nucleare. Secvența modificărilor ultrastructurale celulare provocate de necroză și apoptoză este următoarea (fig. 17.2).

Senescența, alterând echilibrul dintre proliferare, diferențiere, supraviețuire și moarte celulară, se însoțește de reducerea potențialului replicativ și de o rarefacție celulară progresivă în majoritatea organelor, determinată de creșterea indicelui apoptotic.

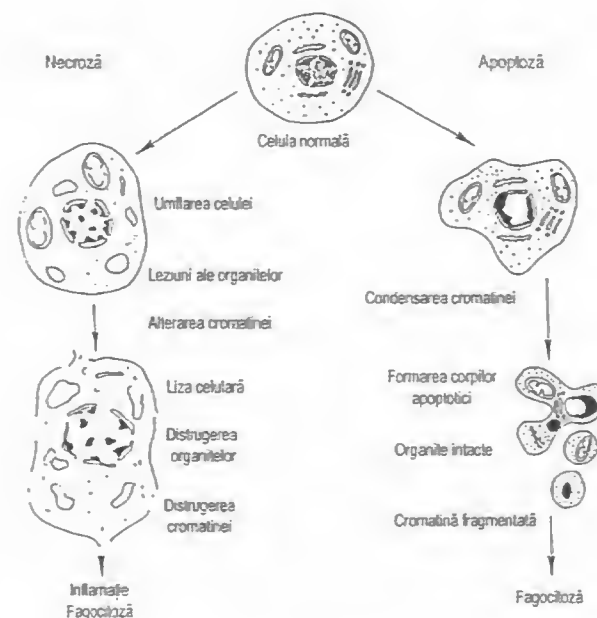


Fig. 17.2. Modificări ultrastructurale celulare produse de apoptoză și necroză (după Adolphe și colab., 1995).

Cea de a doua tenie, *a radicalilor liberi*, acordă atenție deosebită produșilor toxici rezultați din reducerea parțială a oxigenului de tipul anionului superoxid (O_2^-), peroxidului de hidrogen (H_2O_2) și radicalilor oxidril ($OH\cdot$). Creșterea acestora odată cu vârsta, la nivel tisular, celular și subcelular, a constituit baza de plecare a cercetărilor clinico-experimentale care atribuie radicalilor liberi derivați din oxigen un rol determinant în senescență. Conținând un electron nepereche, acești radicali liberi sunt puternic reactivi și ușor difuzibili, deși au o durată scurtă de viață.

Ei participă atât la realizarea unor procese fiziologice, cum sunt cele de transducere a energiei luminoase în semnal electric la nivel retinian, cât și la producerea degradărilor celulare, adeseori ireversibile. Acestea din urmă sunt consecințe fie ale distrugerii membranelor celulare, mitocondriale și lizozomale prin procese de peroxidare lipidică, fie ale alterării grupărilor tinice din structura protein-enzimelor tiol-dependente.

Teoria radicalilor liberi derivați din oxigen a senescenței susține că îmbătrânirea este potențial tratabilă cu ajutorul substanțelor antioxidante de tipul vitaminelor C și E. În afara prelungirii duratei de viață, antioxidanțele, reducând formarea de radicali liberi, ar produce inhibarea creșterii tumorale și ar întârzia declinul reacțiilor imunologice. Sunt puncte de vedere care atrag atenția asupra toxicității oxigenului și relațiilor de cauzalitate dintre oxigen și bătrânețe.

Referitor la limitele vieții, se știe că, odată cu procesul progresiv de îmbătrânire, are loc o scădere continuă a funcțiilor maxime tisulare și celulare. Potențialul de rezervă al acestora scade anual cu aproximativ 1,5%, fenomen involutiv dublat de reducerea exponențială a capacităților de adaptare, apărare și menținere în limite constante ale mediului intern supus solicitărilor stresante ale mediului extern. Hipoxia, printre altele, determină inhibarea extinderii prin transport activ a calciului intracelular și acumularea sa în mitocondrii și reticulul endoplasmatic, urmată de alterări celulare ireversibile.

Mnarea naturală, având determinism genetic ca și nașterea, survine în momentul în care metabolismul energetic și funcțiile celulare reduse scad sub 20% din valurile de bază și când echilibrele homeostatice generale și locale nu mai pot asigura reacțiile adaptative metabolice și funcționale ale celulelor beneficiare. Conceptul de mnare naturală, produsă de procesele de involuție și îmbătrânire fiziologică avansată, este adeseori greu de diferențiat de cel de mnare prematură de cauză patologică sau prin accident. Cele două concepte sunt frecvent complementare, încercările de demarcare a acestora fiind arbitrare.

17.3. MODIFICĂRI CONFORMAȚIONALE

Prin alterările produse la nivel celular și subcelular, senescența determină modificări de diferite grade, nu numai pe plan metabolic și funcțional, ci și anatomic. Una dintre acestea este reducerea staturală. Pierderea în înălțime începe de la 30 de ani și continuă odată cu vârsta, într-un ritm de până la 1 cm în fiecare decadă. Ea se datorează atât curbaturii spinale și tasării discurilor intervertebrale, cât și aplatizării arcurilor plantare.

În afara acestora, un loc important îl dețin modificările conformaționale de cauză trmică sau degenerativă.

Lățimea umerilor scade, de asemenea, la ambele sexe, datorită reducerii masei musculare a deltoizilor, în timp ce circumferința toracă crește ca urmare a scăderii forței elastice pulmonare asupra cuștii toracice.

Greutatea corpului are tendință la creștere în jurul vârstei de 50 de ani, pentru ca, după 60 de ani, să scadă, mai frecvent la bărbat decât la femeie. Femeinul creșterii ponderale la vârsta medie depinde de alimentație, stilul și standardul de viață. La vârstnici, creșterea greutății corporale se realizează pe seama acumulării de țesut adipos. Apa, ca principal constituent al organismului, din contră, scade atât din sectorul intracelular, cât și din cel extracelular. Deshidratarea tisulară apare mai evidentă la nivelul pielii (uscăciune, riduri etc.).

La scăderea greutății corporale contribuie nu numai deshidratarea și reducerea masei musculare, ci și fenomenele de atrofiere parțială a unor viscere (ficat, rinichi). Excepție face doar prnata, a cărei greutate se dublează la bărbatul vârstnic.

17.4. MODIFICĂRI FUNCȚIONALE LA NIVELUL DIVERSELOR ȚESUTURI ȘI ORGANE

Ca urmare a modificărilor metabolice și structurale, senescența afectează funcțiile diverselor țesuturi și organe, începând cu sângele și țesuturile de susținere și sfârșind cu organele neuro-endocrine implicate în reglarea și adaptarea organismului la solicitări.

Sângele, ca țesut lichid circulant format din elemente figurate suspendate în plasmă, poate prezenta variații de diferite grade ale ambelor sale componente.

Eritrocitele pe măsură ce îmbătrânesc prezintă modificări biochimice și morfologice care determină scutarea lor din circulație, după o durată medie de viață de 120 de zile. Ele pierd potasiu și devin fragile la presiune mecanică și osmotică. După 65 de ani poate apărea o scădere a numărului de eritrocite, a hematocritului și hemoglobinei. Viteza de sedimentare a hematitelor și vâscozitatea sângelui cresc ca urmare a modificărilor survenite în concentrația proteinelor plasmatică și, în special, a fibrinogenului. Volumul sanguin se menține în limite constante până la 80 de ani. Peste această vârstă se produce o creștere a raportului dintre volumul sanguin și masa de țesut activ.

Modificări semnificative apar și în cazul seriei albe. Granulocitele, de exemplu, prezintă o creștere a lobulației și conținutului în ARN, dublată de scăderea granulației și limfopeniei. Numărul și funcțiile trombocitelor rămân nealterate. Hematopoieza scade însă cu vârsta, datorită înlocuirii măduvei osoase roșii cu măduvă galbenă, mai ales la nivelul oaselor lungi.

Compoziția chimică a plasmăi sanguine prezintă modificări minime la vârstnici, reprezentate de scăderea calciului ionizat și a bicarbonaților. După 50 de ani, bicarbonatul plasmatic scade cu aproximativ 1% în fiecare decadă, ducând la reducerea progresivă a pH-ului până la 7,30 în cazul vârstnicilor.

Țesuturile de susținere suferă, de asemenea, modificări odată cu vârsta, determinate de scăderea conținutului în apă și a componentelor sale din spațiile extracelulare în favoarea componente solide. Ca urmare a acestor modificări, țesutul conjunctiv de suport intercelular își reduce conținutul substanței fundamentale atât în mucopolizaharide, dispuse sub formă de gel hidratat, cât și în proteine fibroase, collagen, elastină și fibre reticulare, sintetizate de către fibroblaste. În țesuturile care asigură mobilitatea, modificările substanței fundamentale privesc acidul hialuronic ca principal component al acesteia, iar, în cele de suport propriu-zis, conținutul sulfatului este afectat în mod predominant.

Maturarea se însoțește de creșterea densității gelului hidratat și de scăderea conținutului în apă al substanței fundamentale. Difuziunea substanțelor prin membrana bazală bogată în glicoproteine și lipide este potențial perturbată, afectând nutriția celulară și procesele de reparație și vindecare tisulară. Ca urmare a solubilității și turnover-ului mai redus al collagenului, excreția hidroxiprolinei scade, în timp ce fibrele de collagen cresc ca număr și mărime, devenind mai stabile. Proprietățile mecanice ale acestora schimbându-se, este necesară o forță mai mare pentru a obține extensia lor dar, odată întinse, acestea revin lent la lungimea inițială.

Fibrele de elastină devin, de asemenea, mai rigide odată cu vârsta și se fragmentează sub influența întinderii continue, dând naștere pseudoelastinei. La rândul lor, fibrele reticulare ce se găsesc din abundență la tineri tind să fie înlocuite (ca și fibrele de elastină) de către collagen.

Faza de rigidizare crescândă în cazul vârstei înaintate se însoțește pe plan enzimatic de creșterea concentrației collagenazei, iar pe plan funcțional de reducerea mobilității și performanțelor fizice în general.

Cartilajele se deshidratează prin senescență, transformându-se în fibrocartilaje. Cartilajul articular hialin, care este translucid la tineri, devine opac și galben la vârstnici. Elasticitatea lui dispare, prezentând predispoziție la calcificare și transformare osoasă.

Cartilajele constale devin mai rigide, iar plămânii își pierd capacitatea de destindere datorită fibrozării. Pierderea hidratării nucleului pulpos al discurilor intervertebrale duce la compactarea vertebrelor și la reducerea staturii corporale.

Modificările țesutului conjunctiv produse de vârstă fiind globale, ele afectează în egală măsură și pielea, a cărei elasticitate se pierde progresiv.

Alterarea progresivă a matricei conjunctive influențează și distensibilitatea cardio-vasculară. Cordul devenind mai puțin distensibil, își diminuează contractilitatea, iar arterele elastice devin mai rigide.

Oasele pierd săruri minerale, contrar țesutului fibros predispus la depuneri de calciu. Când pierderile depășesc 10% apar fenomene de osteoporoză la vârstnici. La oasele lungi, pierderea de minerale este asociată cu remodelarea suprafeței periostale. Canalele haversiene se largesc, iar spațiul ce se dezvoltă este umplut cu țesut fibros și adipos. Reducerea zonei compacte a oaselor lungi scade rezistența acestora, predisponând la fracturi mai greu vindecabile la senescență.

Pierderea masei osoase este inegală la cele două sexe. Sexul feminin este mai expus la osteoporoză, mai ales după menopauză. Echilibrul dintre activitatea osteoblastică și cea osteoclastică apare perturbat în absența hormonilor estrogeni. În lipsa estrogenilor circulanți se intensifică activitatea osteoblastică a parathormonului, dublată de scăderea absorbției intestinale a calciului, datorită deficitului de vitamină D, hidroxilată. Demineralizarea se produce și la nivelul vertebrelor, afectând ambele sexe vârstnice și determinând fie deformarea în cocoșă a coloanei vertebrale, fie tulburări ischemice cerebrale generate de pensarea arterelor din zona cervicală.

Mușchii prezintă scăderea progresivă a masei active până la 30%. Scăderea este neuniformă, interesând într-o măsură mai mare mușchii roșii. Pierderea masei musculare se realizează pe seama reducerii numărului și mărimii fibrelor și este dublată de acumularea lipofuscinei și creșterea conținutului în lipide. Concomitent cu reducerea lungimii fibrelor musculare active, spațiul extracelular crește, umplut fiind cu țesut conjunctiv de susținere. Reducerea forței musculare rezultate poate fi parțial diminuată prin exerciții fizice. Microscopic s-a constatat scăderea numărului de miofibrile și proliferarea tubilor T, iar pe plan biochimic, reducerea ATP, glicogenului și creatin fosfatului.

Electromiograma la vârstnici prezintă scăderea amplitudinii însoțită de prelungirea potențialelor de acțiune individuale și creșterea numărului de potențiale polifazice. Perioadele refractare absolute și relativă, de asemenea, cresc, în timp ce durata latenței, contracției și relaxării se alungește.

Pielea, situată la interfața dintre organism și mediul înconjurător, îndeplinește roluri multiple (teritoriul receptor, barieră impermeabilă, protecție antimicrobiană, suprafață termoreglatoare).

Pe măsură ce pielea îmbătrânește, își reduce capacitatea de reînnoire (care la tânăr și adult nu depășește 2 luni), ca urmare a diminuării numărului de celule germinative. Rezistența joncțiunilor dintre epiderm și corion scade, ca și densitatea melanocitelor, producând paloarea caracteristică vârstnicului. Substanța fundamentală se deshidratează, elementele fibrilare își pierd elasticitatea, iar pielea se subțiază și se încrețește, mai ales la nivelul zonelor cu mobilitate mare, cum este cazul tegumentelor feței. Creșterea și albirea părului, de asemenea, sunt influențate de vârstă. Încărunțirea părului după vârsta de 30 de ani se datorează reducerii activității melanocitelor.

Căderea părului începe la 30 de ani în cazul bărbaților și după menopauză la femei. Secreția glandelor sebacee scade după 60 de ani la femeie și în jurul a 70 de ani la bărbat. Glandele sudoripare devin hiposecretoare, excepție făcând doar cele de la nivelul scalpului.

Formațiunile receptoare cutanate (corpusul Meissner, Pacini etc.) scad ca număr și sensibilitate, deși densitatea terminațiilor nervoase nu pare a fi afectată.

Pierderea țesutului adipos subcutanat în multe părți ale corpului reduce capacitatea acestuia de izolator termic.

Apărarea contra pătrunderii microorganismelor apare diminuată datorită atât uscăciunii pielii, cât și reducerii celulelor Langerhans, prevăzute cu proprietăți reticulo-endoteliale.

Dinții cad mai mult din cauza neglijării igienei dentare decât a vârstei. Căderea dinților apare mai frecvent la nivelul maxilarului superior, ca urmare a degradării lor prin cariere sau alterare parodontală. Fluorizarea apei și îmbunătățirea igienei bucale, reducând incidența cariilor și infecțiilor buco-dentare, pot evita sau temporiza edentația vârstnicilor. Procesul de degradare dentară privește atât smalțul, care se pigmentează și se pierde prin atriție, cât și dentina, a cărei activitate odontoblastică reduce cavitatea pulpară până la obstruare completă. La acestea se adaugă slăbirea ligamentelor periodontale, atrofia gingivală și resorbția osoasă de la nivelul zonei alveolare.

Mucoasa bucală prezintă un oarecare grad de atrofiere și uscăciune, ca urmare a secreției mai reduse de mucină și salivă. Papilele filiforme și circumvalate de pe suprafața limbii se atrofiază, diminuând sensibilitatea gustativă cu aproximativ 30% la vârsta de 70 de ani.

Aparatul respirator prezintă o gamă variată de modificări ale ventilației pulmonare și schimburilor gazoase de cauză ioracică sau parenchimatoasă, alveolo-capilară. Pe măsură ce plămânii avansează în vârstă, volumul ocupat de căile respiratorii crește în detrimentul teritoriului de schimb alveolar. Suprafața alveolară se reduce de la aproximativ 80 m² (la 30 de ani) la 65–70 m² la vârsta de 70 de ani.

Elasticitatea parenchimului pulmonar diminuează cu vârsta, datorită alterării fibrelor de collagen. Surfactantul pulmonar este, de asemenea, diminuat, ca urmare a reducerii numărului de pneumocite – tip II alveolare, secretoare de surfactant.

Compliancea toracelui scade la vârstnici din cauza calcificării cartilajelor costale și accentuării curburii coloanei vertebrale. Ventilația pulmonară se realizează în aceste condiții cu un efort muscular mai intens din partea mușchilor respiratori. Dintre volumele respiratorii, modificări majore în sensul creșterii prezintă volumul rezidual și volumul expirator de rezervă. Ca urmare, capacitatea reziduală funcțională crește, în timp ce capacitățile vitale și inspiratorie scad. Schimburile gazoase la nivel alveolo-capilar, de asemenea, scad, datorită reducerii suprafeței de schimb alveolare. Conținutul în 2,3-difosfoglicerat al hematiilor fiind mai mic, curba de disociere a oxihemoglobinei este mutată la stânga, iar descărcarea oxigenului în țesuturi se realizează mai greu.

Sistemul cardio-vascular este afectat de senescență ca urmare a modificărilor survenite la nivelul țesutului muscular și de susținere din cord și vase, cu răsunetul funcțional corespunzător asupra contractilității, distensibilității și elasticității arborelui vascular și a motopompei biologice.

Greutatea cordului și volumul expirator de rezervă. Ca urmare, capacitatea de adaptare hipertrofică la diversele solicitări stresante scade. Conținutul miocardic în țesut conjunctiv și pigment lipofuxinic crește odată cu vârsta, iar mitocondriile scad ca mărime. Valvulele cardiace prezintă adeseori depozite calcare și tendință la fibrozare. La nivelul arterelor apar alterări structurale determinate de creșterea collagenului și reducerea țesutului elastic, însoțite de reducerea compliancei vasculare. Reducerea expansiunii aortice este compensată de îngroșarea peretelui arterial și de hipertrofia ventriculului stâng după 60 de ani.

Venele devin sinuoase și prezintă varicozități în zonele supuse presiunilor crescute, ca urmare a alterării intimei și tunicii medii. Capilarele prezintă, de asemenea, îngroșări ale membranei bazale, cu consecințe negative asupra schimburilor lichidiene și nutritive tisulare.

La nivelul miocardului, atât faza izometrică, de punere în tensiune a fibrelor musculare cardiace, cât și durata fazei de relaxare sunt prelungite. Platoul potențialului de acțiune a fibrei miocardice este, de asemenea, alungit, ca urmare a alterării dinamicii calciului la nivel celular. Reactivitatea modulului sinoatrial și a cardiomiocitelor la stimularea beta-adrenergică scade după 60 de ani.

Procesul progresiv de fibrozare afectează atât celulele nodale, cât și miocardul contractil. Perioada de preexcitație și sistola electro-mecanică se lungesc, ca urmare a scăderii forței de contracție a miocardului. Debitul cardiac scade cu aproximativ 1% pe an de vârstă între 20 și 80 de ani, datorită atât hiposistoliei, cât și reducerii frecvenței cardiace. Reacțiile adaptative de tip bradicardizant sau tahicardizant sunt mai slabe la vârstnici decât la tineri și adulți.

Lucrul mecanic al inimii scade cu vârsta, în timp ce rezistența vasculară periferică crește anual cu 1% după 40 de ani, determinând reducerea fluxului sanguin cerebral, splanhnic și cutanat. Scăderea debitului de perfuzie a rinichilor poate atinge după 40 de ani 50% iar a creierului 20%.

La rândul său, presiunea arterială crește, prezentând valori mai mari ale maximei decât ale minime.

La persoanele foarte vârstnice, presiunea minimă (diastolică) poate chiar scădea. Revenirea la valorile normale atât a frecvenței cardiace, cât și a presiunii arteriale perturbate de un efort oarecare se realizează mai lent la senescență.

Rinichiul vârstnic prezintă alterări vasculare și tubulare de diferite grade, compatibile însă cu funcțiile sale depuratorii bazale. Numărul anselor capilare glomerulare este mai mic, iar arterele arcuate și interlobare devin sinuoase. Capilarele glomerulare degenerare sunt suplate de prezența unor by-pass-uri arteriolare, mai ales în glomerulii juxtamedulari. La nivelul vaselor peritubulare apar o serie de benzi musculare longitudinale și înlocuirea musculaturii netede cu collagen. Celulele interstițiale din zona medulară renală sunt înlocuite cu materialul extracelular conjunctiv. Alterarea interstițiului medular, dublată de pierderile glomerulare juxtamedulare, duce la reducerea capacității de filtrare și concentrare a urinei la vârstnici.

Greutatea rinichilor scade progresiv după 40 de ani, atingând în cazul vârstei avansate doar 70% din valoarea constatăată la adult. Ca urmare, debitul sanguin de perfuzie renală diminuează odată cu vârsta. La 80 de ani, perfuzia renală poate scădea până la 50% din cea a adultului tânăr. Pierderea capacității de concentrare a urinei se datorează insuficienței secreției de renină a aparatului juxtaglomerular, cu răsunele corespunzător asupra formării de angiotensină, secreției de aldosteron și hormon antidiuretic.

Capacitatea de a forma și excreta amoniac este, de asemenea, redusă, ca urmare a scăderii reabsorbției tubulare. Participarea rinichiului la menținerea echilibrului acido-bazic este mai puțin afectată și este dependentă de viteza de corecție a celorlalte-dezechilibre homeostazice.

Tubul digestiv este afectat de senescență pe două principale căi:

- 1) slăbirea capacității de proliferare și refacere a epitelului tractului digestiv;
- 2) distrugerea și pierderea de neuroni ai sistemului nervos enteric care coordonează activitatea motorie și pe cea secretorie digestivă prin plexurile submucos și mienteric.

La nivelul cavității bucale are loc pierderea progresivă a dentiției, urmată de tulburarea masticației și reducerea secreției salivare. Protezarea alterează sensibilitatea gustativă și accentuează deficitul secretor de mucus și pialină salivară.

La nivel *esofagian* pot apărea perturbări ale deglutiției, determinate de lipsa de coordonare a mișcărilor peristaltice cu funcția sfincieriană a esofagului. Ca rezultat al disfuncției respective se produce întârzierea intrării alimentelor în stomac. Sfincterul esofagian inferior, nerelaxându-se la sosirea unei peristaltice, creează senzația de plenitudine substernală și pericolul aspirației la persoanele vârstnice care se alimentează în poziție clinostatică.

La nivelul *stomacului* se constată adeseori fenomene de gastrită atrofică și o prelungire a timpului de golire gastrică.

Testele de stimulare a secreției gastrice pun în evidență o reducere a capacității secretorii după 40 de ani, mai frecventă la bărbați decât la femei. Scăderea acidității gastrice este dublată de cea a secreției de pepsină. În gastrita atrofică se constată uneori reducerea secreției de factor intrinsec și predispoziție la anemie pernicioasă.

Suprafața de absorbție a *intestinului subțire* este semnificativ diminuată la vârstnici, datorită reducerii înălțimii vililor și aplatizării mucoasei. Cu toate acestea, absorbția principalilor nutrienți nu apare tulburată la persoanele vârstnice. Absorbția mai redusă a calciului ține de insuficiența resorbției a vitaminei D.

Pancreasul nu prezintă modificări semnificative ale funcției sale exocrine, cu răsunet important asupra digestiei. Intoleranța la lipide a unor vârstnici nu pare a fi de cauză pancreatică.

Ficatul, care reprezintă 2,5% din greutatea corporală a adultului, pierde progresiv din greutate începând de la vârsta de 40 de ani. La bătrâni, greutatea ficatului atinge 1,5% din greutatea corporală. Hepatocitele rămase devin mai mari și multinucleate. Deși mai redusă, sinteza hepatică se menține la un nivel suficient de ridicat. Capacitatea de metabolizare a diverselor droguri este însă mai redusă.

Intestinul gros prezintă la vârstnici diferite grade de atrofie a mucoasei, hipertrofia muscularis mucosae și atrofia musculaturii propriu-zise. Asociate cu creșterea presiunii luminale, aceste modificări predispun la producerea diverticuliilor.

Pe de altă parte, pierderea de celule nervoase enterice generează fenomene de incoordonare a motilității, ce predispun la constipație. Aceasta este de fapt multifactorială. Constipația vârstnicului are la bază nu numai scăderea tonusului și a motilității colice, ci și creșterea pragului de excitație a receptorilor implicați în reflexul de defecație, precum și regimul cu fibre proteice sau abuzul de laxative.

Sistemul endocrin, având un rol primordial în realizarea și menținerea mecanismelor reglatoare și adaptative, prezintă importante schimbări morfo-funcționale la persoanele vârstnice. Acestea țin atât de țesutul glandular specific al unei anumite glande, cât și de formațiunile nervoase coordonatoare ale activității sale secretorii (hipotalamus) și densitatea receptorilor de la nivelul organelor-țintă.

Hipofiza nu își modifică greutatea, dar prezintă o reducere a vascularizației și o creștere a conținutului în țesut conjunctiv la persoanele vârstnice. În timp ce cresc celulele cromofobe, scad numeric celulele eozinofile (secretează de hormoni somatotrop și prolactină). Cu toate acestea, conținutul în hormon de creștere al hipofizei anterioare nu se modifică în funcție de vârsta avansată. La persoanele vârstnice, secreția de somatotrop nu mai crește în timpul somnului și nici în efortul fizic, ca la tineri și adulți.

Prolactina plasmatică are tendință la creștere la bărbatul vârstnic și la scădere după menopauză la femeie.

Tirotropina, deși nu prezintă schimbări plasmatice semnificative, răspunsul secretor al hipofizei la administrare de TRH este mai slab. Corticotropina se menține în limite normale atât la nivel hipofizar, cât și în plasmă, în condiții bazale sau de stres.

Gonadotrofinele (FSH, LH) se mențin la un nivel ridicat la ambele sexe vârstnice, datorită lipsei de control al secreției lor hipofizare de către hormonii periferici prin reacții normale de *feed-back* negativ.

Vasopresina prezintă, de asemenea, valori circulante mai mari la vârstnici decât la tineri, cu răspuns exagerat la stimulii osmotici.

Suprarenalele scad ușor în greutate după 50 de ani, cu acumulare de țesut conjunctiv și pigment în tot cortexul. Nivelul glucocorticoizilor, ritmul circadian și capacitatea de răspuns la ACTH rămân normale. Concentrația plasmatică a aldosteronului scade ca urmare a deficitului secreției de renină formatoare de angiotensină aldosteron-eliberatoare. Androgenii scad odată cu înaintarea în vârstă.

Pancreasul își menține structura și secreția hormonală bazală în limite normale, dar prezintă un oarecare grad de deteriorare a toleranței la glucoză, ce poate începe la adultul de vârstă medie. Această întârziere a răspunsului hormonal privește atât secreția de insulină, cât și pe cea de glucagon.

Tiroida involuează mai mult pe plan structural decât secreția de insulină, fără modificări semnificative ale secreției tiroidiene. În timp ce concentrația plasmatică a tiroxinei rămâne neschimbată, triiodotironina scade cu vârsta, datorită incapacității de conversie a T_4 în T_3 la nivel hepatic.

La nivelul *paratiroidelor* se produce o acumulare de țesut adipos până la 40% din greutatea glandelor. La bărbat are loc o creștere a secreției de parathormon până la 50 de ani, după care urmează revenirea la valorile inițiale din tinerețe. La femeie, din contră, creșterea se menține și după menopauză, predispunând la osteoporoză.

Ovarile prezintă o scădere în greutate și reducerea numărului de foliculi după 30 de ani. Înaintea menopauzei diminuează și capacitatea de formare a corpului galben. Ovulele formate în ultima fază a vieții reproductive au o viabilitate mai redusă, iar riscul abnormalității cromozomiale este mai mare. Lipsa hormonilor ovarieni, dublată de excesul de gonadotrofine circulante, generează simptomele caracteristice climaxului.

Organele sexuale secundare femele involuează după 50 de ani. Se realizează pierdere progresivă a collagenului și elastinei, determinând involuția uterului și retracția vaginului și trompelor. În lipsa estrogenilor se produce keratinizarea și uscăciunea mucoasei vaginale. Fenomene involutive apar și la nivelul glandelor mamare, reprezentate de atrofia acinilor glandulari și reducerea țesutului adipos.

Testiculele nu și modifică semnificativ greutatea, deși prezintă o creștere a țesutului fibros în spațiile intertubulare. Secreția celulelor germinative – Sertoli – continuă, iar cea a celulelor interstițiale – Leydig – scade cu vârsta. Ca urmare, producerea de spermă cu un procentaj de până la 70% spermatozoizi activi poate apărea până la 70 de ani, cu tot deficitul secretor progresiv de hormoni androgeni.

Organele sexuale secundare masculine prezintă modificări importante odată cu vârsta. Prostata se hipertrofiază progresiv, pe seama acumulării de țesut conjunctiv. Musculatura needă a penisului se atrofiază, iar veziculele seminale acumulează cantități mari de pigment granular.

Virilizarea suferă, de asemenea, un proces lent de involuție.

Sistemul nervos este afectat de senescență atât pe plan structural, cât și din punct de vedere metabolic, cu consecințe funcționale variabile.

Greutatea creierului scade la vârsta de 80 de ani cu aproximativ 7%, respectiv 100 g, ca urmare a reducerii arilor corticale, mai ales anterioare. Se produce o pierdere continuă atât de corpi celulari neuronali, cât și de fibre neuronale, estimată la 50 000 de neuroni pe zi din totalul de 10 miliarde. Plasticitatea mare a țesutului nervos cerebral suplează însă aceste pierderi zilnice.

Celulele Golgi de tipul II sunt în mod particular afectate, iar celulele piramidale ale straturilor III cortical își pierd dendritile de asociație orizontală. Cele mai mari pierderi apar în girurile precentral și temporal superior și în aria striată.

Pierderi similare apar și în cerebel, dar mai tardiv. Nucleii trunchiului cerebral sunt puțin afectați, cu excepția nucleului locus coeruleus, care prezintă pierderi neuronale după 65 de ani.

La nivelul nervilor periferici se înregistrează reducerea fibrelor atât aferente, cât și eferente.

Modificările nervoase produse de senescență afectează ou numai neuronii, ci și celulele gliale. La nivel neuronal, axonii prezintă fenomene de degenerescență neuro-axonală, caracterizate prin lipsa tecii de mielină și prezența unor umflături cilindroxonale. Astfel de procese degenerative pot fi observate la 30% din persoanele vârstnice, mai ales la nivelul cordoanelor medulare posterioare. La nivelul corpului neuronal apare pigmentul autofluorescent lipofuscină, denumită și „pigmentul bătrâneții”, ca produs de peroxidare al elementelor structurale neuronale. De aici, utilitatea vitaminei E în tratamentul oboselii oervoase.

După 60 de ani, numărul microtuburilor neuronale scade, iar la nivelul hipocampusului pot apărea fenomene de degenerescență granulo-văsculară. În local microtuburilor se produc o serie de împletituri neuro-fibrilare, care sunt de fapt microtubuli aranjați în dublu helix. Aceste modificări sunt caracteristice demoeței senile de tip Alzheimer și se prezintă fie sub formă de zone distincte sau coalescente de plăci degenerative interstițiale.

Degenerarea dendritică cu acumulare de amiloid duce după vârsta de 60 de ani la apariția plăcilor neuritice senile în cortex și mai rar în hipotalamus și sistemul limbic. Neuronii adiacenți pot dezvolta o sinaptogenă reactivă prin înmugurire axonală, restabilind parțial circuitul pierdut. Celulele gliale se hipertrofiază la vârstnici, mai ales în teritoriile sinaptice. Numărul astrocitelor ou este afectat, în timp ce densitatea oligodendroglilor scade.

Mediatorii transmiterii chimice interneuronale sintetizați în corpul neuronal migrează mai lent de-a lungul fibrei axonale la vârstnici, contribuind la creșterea întârzierii sinaptice și la lentoarea răspunsului postsinaptic. Transportul axonal perturbat deține un rol fundamental în geneza bolilor degenerative centrale și periferice. Alterarea proceselor metabolice ale sintezei, transportului, eliberării sau acțiunilor exercitate de substanțele mediatore în teritoriile postsinaptice și presinaptice influențează profund reacțiile comportamentale și sistemele reglatoare neuro-umorale centrale.

Sistemul colinergic cerebral este implicat la vârstnici atât în scăderea capacității de memorare, cât și în producerea parkinsonismului și bolii Alzheimer. Spre deosebire de colin acetilază care scade, activitatea acetilcolinesterazei crește. Rezultatul este reducerea conținutului în acetilcolină al creierului la vârstnici.

Enzimele implicate în biosinteza catecolaminelor, de asemenea, scad cu vârsta, în timp ce monoaminooxidaza (MAO) prezintă o activitate mai intensă. În felul acesta, concentrația noradrenalinei în creierul mijlociu scade cu 40-50% după 70 de ani. Conținutul în dopamină al căilor nigro-striate fiind într-o continuă scădere, după 60 de ani stă la baza tremurului parkinsonian. Acesta beneficiază parțial de tratamentul de substituție cu L-DOPA și inhibitori ai MAO.

Reflectivitatea medulară apare deprimată, iar timpul de reacție se alungește cu aproximativ 30% la vârstnici.

Sensibilitatea senzitivo-senzorială prezintă, de asemenea, importante modificări. Sensibilitatea cutanată scade, ca urmare a degradării receptorilor încapsulați și a discurilor Merkel. Pragul crescut al sensibilității dureroase este inversat la persoanele foarte vârstnice, din cauza degradării pielii și a expunerii unui număr mai mare de fibre nervoase libere la stimulii nociceptivi.

Sensibilitatea proprioceptivă își pierde acuratețea datorită atât reducerii numărului de receptori din capsule articulare, cât și deteriorării fibrelor nervoase din cordoanele posterioare.

Diminuarea auzului și văzului are o evoluție liniară cu vârsta și se datorește modificărilor survenite nu numai la nivelul segmentului receptor periferic, ci și al căilor eferente și proiecțiilor corticale ale analizorului senzorial respectiv.

În cazul auzului, membrana timpanică devine mai rigidă, ca urmare a creșterii rigidității lanțului de oscioare. Atât membrana bazilară, cât și membrana Reissner suot mai groase, datorită depozitării lipidice și dezvoltării țesutului conjunctiv. Alterări progresive au loc la nivelul organului Corti și neuronilor căii auditive.

Scăderea sensibilității auditive la vârstnici este mai evidentă pentru frecvențele înalte.

Vederea este afectată de senescență pe mai multe căi. Dispariția grăsimii retroorbitare determină recesia globului ocular.

Pierderea de țesut elastic al sprâncenelor și pleoapei superioare predispune la ptoză și ocluzie a câmpului vizual superior. Corneea devine mai sferică și mai subțire, ca urmare a pierderii de endoteliu cornean. Camera anterioară devine mai mică, ca rezultat al îngroșării cristalinului, în timp ce diametrul pupilei este redus, diminuând cantitatea de lumină ajunsă la retină. La 60 de ani, lumina ce ajunge la retină reprezintă doar o treime din cea de la vârsta de 20 de ani.

Umoarea apoasă prezintă o pigmentație autofluorescentă de culoare gălbuie. Cea mai evidentă modificare a acuității vizuale la vârstnici este presbiopia, reprezentată de pierderea acomodării la vederea de aproape, ca urmare a reducerii flexibilității cristalinului și creșterii diametrului său antero-posterior. Acomodarea se realizează mai leot, datorită scăderii forței contractile a mușchilor ciliari. Corpul vitros își pierde hidratarea, favorizând formarea unor componente mucoide, observate sub formă de flocoane în câmpul vizual.

Densitatea receptorilor retinieni scade mai ales la nivelul foveei centrale, ducând la diminuarea acuității vizuale. Procesele fotochimice ale vederii scad în intensitate odată cu vârsta, afectând adaptarea la întuneric și lumină.

Aparatul vestibular prezintă adeseori semne de degenerare a maculei de la nivelul saculei și utriculei. Datorită acestui fapt, persoanele vârstnice sunt mai rezistente decât tinerii adulți la răul de mișcare.

Reacțiile somato-vegetative induse de proba rotatorie sunt mai lente și mai slabe la vârstnici, ca urmare a reducerii eliberării mediatorilor chimici și acțiunii lor specifice la nivelul organelor efectoare.

În general, senescența, reducând reactivitatea atât a teritoriilor receptoare, cât și a centrilor, căilor și organelor efectoare realizează stabilirea și menținerea echilibrului homeostazice ale vârstnicului la un nivel mai scăzut decât al adultului tânăr, compatibil însă cu starea de sănătate, adeseori greu de diferențiat de sfera patologicului. Diferența între senescența fiziologică și cea patologică poate fi stabilită numai de către clinician, pe baza examenului clinic și paraclinic, de explorare funcțională, instrumentală și biochimică de specialitate.

Pentru a menține starea de sănătate a vârstnicului în limitele senescenței fiziologice, grevată de multiple deficite morfo-funcționale posibile, este necesar să se țină seama că activitatea fizică și intelectuală apare benefică marilor funcții ale organismului și vitalității.

Viața activă adecvată vârstei exercită efecte sanogenetice atât pe plan biologic, cât și din punct de vedere psihologic. Ea asigură normalitatea funcțiilor somato-vegetative, comportamentale și ideative și, totodată, pune la adăpost de fenomenele depresive provocate de sedentarism și solitudine.

Întregind viața activă cu măsuri igienico-dietetice, pentru a se evita riscul hiperpoaderabilității sau îmbolnăvirii și, la nevoie, cu proceduri kineziterapice corespunzătoare vârstei (mișcare în aer liber, gimnastică respiratorie, masaj local sau general etc.), se pot adăuga „ani vieții și viața anilor”.

18. FIZIOLOGIA APARATULUI LOCOMOTOR

Rezultat al unei îndelungate filogeneze și al unei ontogeneze nu puțin complicate, corpul omenesc și-a dezvoltat un dispozitiv de postură și mișcare adecvat activităților sale complexe prin interacțiunea sa continuă cu mediul înconjurător. Acesta a fost asimilat, în accepțiunea modernă, cu noțiunea unui adevărat aparat locomotor, dotat cu roluri statice și kinetice, pe cât de multiple și diverse, pe atât de importante.

18.1. MIȘCAREA, POSTURA ȘI DEZVOLTAREA FUNCȚIEI LOCOMOTORII

Înțeasă în sensul deplasării ansamblului organismului sau al unor părți din acesta în spațiu, activitatea locomotorie ia formele cele mai diferite în cursul dezvoltării filogenetice. De la mișcarea de cicloză ameboidă, ciliară sau flagelară a organismelor monocelulare prevăzute cu dispozitive contractile nemusculare (pseudopode, membrane ondulate, cili și flageli), motricitatea a câștigat treptat noi atribute în cadrul activității contractile a celulelor musculare înalt diferențiate.

Dotate cu structuri contractile distincte (miofibrile), aceste celule au devenit capabile fie de o activitate autonomă (miocard, mușchi neted) modulate de sistemul vegetativ, fie de o activitate voluntară (mușchi striat scheletic) inițiată și adaptată celor mai variate cerințe de către sistemul nervos somatic.

Perfecționarea continuă a locomoției, în strânsă conexiune cu cea a sistemului nervos somatic și vegetativ a permis organismelor animale, în evoluția lor filogenetică, să dispună de posibilități din ce în ce mai complexe de activitate motorie statică și dinamică în lupta lor pentru satisfacerea în primul rând a instinctelor vitale de hrănire, apărare și perpetuare.

Începând de la statica și mișcarea reptiliană, caracteristică târâtoarelor, și trecând prin „cvadrupedia” animalelor patrupede și „brahijia” primatelor, centrul de greutate a suferit o deplasare spre partea posterioară a corpului, ajungând ca la specia umană să fie localizat la nivelul trunchiului, în dreptul celei de-a doua vertebre lombare. Aceasta a oferit omului un tip net evoluat de postură și locomoție, denumit „bipedie”, care permite poziția verticală și folosirea în mod obișnuit a membrilor inferioare pentru statică și mișcare.

Încă din viața uterină, ființa umană este dotată cu necesitatea reflexă a mișcării, care se face simțită chiar de la sfârșitul primei jumătăți a sarcinii.

Odată cu nașterea, copilul face o serie de mișcări dezordonate, care au la bază o simplă înlănțuire de reflexe dobândite filogenetic.

Începând de la prima lună și până la vârsta de 5 ani, funcția locomotorie parcurge o lungă și complicată cale de dezvoltare, care reflectă în bună parte evoluția filogenetică a posturii și locomoției la animale.

Legată de formarea unui ansamblu de deprinderi posturale și kinetice elementare, locomoția are, la rândul său, o influență hotărâtoare asupra dezvoltării vorbirii, gândirii și tuturor celorlalte activități nervoase superioare proprii ființei umane.

18.2. ELEMENTE DE MORFO-FIZIOLOGIE OSOASĂ

Participant activ la evoluția anatomică și la realizarea unei forme normale a corpului, aparatul locomotor dirijează întreaga activitate stato-dinamică de postură și mișcare a organismului în cele mai variate circumstanțe de solicitare.

El este alcătuit în principal din două sisteme bine distincte, unul cu rol de susținere și de mobilizare pasivă, reprezentat de sistemul de pârghii oséo-articulare, și altul care acționează activ asupra primului, format din ansamblul de mușchi cu nervii lor motori, cunoscut sub numele de sistem neuro-muscular.

Pentru o mai bună sistematizare în sens analitic și sintetic, se vor prezenta mai întâi cele două dispozitive (oséo-articular și neuro-muscular), cu caracteristicile lor morfo-funcționale esențiale, urmând ca în final să fie expuse succint unele date referitoare la mecanismele posturii și locomoției umane, cât și ale mijloacelor de reglare și adaptare pentru diversele activități motorii inițiate de organism prin aparatul său locomotor.

18.2.1. OSUL CA ȚESUT

Oasele sunt incluse, alături de ligamente, tendoane și cartilaje, în clasa țesuturilor conjunctive și reprezintă o importantă parte atât a suportului mecanic și de menținere a integrității structurale scheletice, cât și a celui de transmitere a forței de la elementele active (neuro-musculare) la cele pasive (oséo-articulare) ale aparatului locomotor.

Ca și celelalte componente conjunctive, din punct de vedere structural, oasele sunt compuse din două compartimente majore: celule și matricea extracelulară. Celulele (condroblaste, condrocite, osteoblaste osteocite și fibroblaști) ocupă 3% din volumul total osos și iau parte la sinteza și secreția componentelor organice; acestea sunt asamblate într-o rețea distinctă, organizată sub forma unei matrice extracelulare, în care componenta organică osteoidă este puternic mineralizată și vascularizată. Conținutul hidric reprezintă 8% din volumul total osos; 65% din greutatea uscată este reprezentată de minerale și 35% de matricea organică, în care derivații de collagen sunt majoritari (95%).

18.2.1.1. Bazele morfo-fiziologice ale formării, creșterii și dezvoltării sistemului osos

Formarea oaselor. Este un proces complex de formare a materialului osteogen prin două variante esențiale: intramembranară și endocondrală (cu alternativa pericondrală sau periostică).

a) **Osteogeneza intramembranară** implică osteoblastele diferențiate direct din mezenchim, care secretă matricea osteoidă utilizată ca substrat pentru mineralizare. Acest tip de osteosinteză stă la baza formării oaselor craniului și masivului facial, parțial a claviculei și mandibulei, cât și a întregului țesut periostic.

b) **Osteogeneza endocondrală** asigură formarea restului scheletului din țesut cartilaginios. Procesul are loc pe modelul cartilaginios, trecând prin stadii succesive spre maturare. Inițial se produce o hipertrofie a condrocitelor din zona centrală a diafizei, urmată de invazia în teritoriu a vaselor nutritive, apariția centrilor primari de osificare și, în final, formarea centrilor secundari de osificare epifizară.

Creșterea osoasă este însoțită de mărirea masei și grosimii oaselor prin depunere periostică în cadrul procesului de osificare intramembranară, în timp ce canalul medular se extinde prin resorbție endostală, iar oasele se alungesc prin osificare endocondrală.

Discul cartilajului de creștere dintre diafiză și epifiză, ca parte integrală a plăcii de creștere, este sediul osificării endocondrale. Prezintă zone distincte de osteogeneză la nivelul suprafețelor epifizare și diafizare, unde procesul de osteoformare este mai rapid.

Factorii de control ai creșterii, modelării și maturării osoase. Procesele fundamentale de creștere și maturare osoasă sunt sub controlul permanent a numeroși factori modulatori, la care se adaugă zestrea

genetică – evoluția ontogenetică și neonatală, factorii nutriționali-metabolici, biochimici, farmacologici, circulatori, de vârstă și, în mod particular, cei biomecanici din solicitările fizice.

Factorii modulatori ai creșterii osoase sunt modulatori organici ex-nutriționali ai modelării și remodelării din timpul creșterii osoase, prin facilitarea fie a resorbției, fie a osteoformării:

- factorii stimulatori ai *osteolizei* sunt de natură hormonală: parathormon, glucocorticoizi sau o serie de factori locali în care se includ – factori de creștere de tip epidermal (EGF), fibroblastic (FGF), transformator (TGF), factorul de activare a osteoclastelor, prostaglandine de tip E;

- factorii stimulatori ai *osteosintezei* au trei surse:

- umorală: insulina, STH, somatomedina-C [IGF-I (*insulin-like growth factor*)], hormonii tiroidieni;
- osoasă: proteina (factorul) morfogenetică osoasă (BMP), factorul de creștere scheletic (SGF),

factori de creștere derivați din os (BDGF);

- tumorală (factorul carcinomului prostacic, factorul carcinomului de sân).

Mecanismele modulatorie:

- Hormonul de creștere (STH) acționează indirect, prin somatomedina-C, care mărește sinteza de ADN și collagen și, în același timp, stimulează oxidarea glucozei, transportul de oxigen și sinteza proteinelor.

(STH) hipofizar stimulează predominant osteoformarea, cu creșterea osului în lungime și grosime. Deficitul la copil întârzie creșterea (nanism hipofizar), iar excesul (adenom eozinofil hipofizar) antrenează prepubertar gigantismul, iar postpubertar acromegalia. În ultimul caz, creșterea în grosime a osului se realizează prin stimulare osteoblastică subperiostică.

- Hormonul tiroidian este indispensabil creșterii: deficitul său la copil perturbă creșterea și maturația scheletului, prin întârzierea osificării endocondrale și a cartilajelor de creștere epifizare, frânând mai ales apariția centrilor secundari ai osificării (disgenezia epifizară, din mixedemul infantil).

- Hormonul paratiroidian stimulează resorbția osoasă prin activarea osteoclastelor și inhibarea osteoblastelor.

Atât tiroxina, cât și parathormonul, prin creșterea resorbției osteoclastice și periostale, simultan cu scăderea absorbției intestinale a calciului și intensificarea calciuriei, ocupă un loc important în controlul mineralizării și morfogenezei osoase.

- Insulina operează prin numeroase enzime biosintetice, crescând direct sinteza de collagen în osteoblaste. Calcitonina favorizează osteoformarea prin inhibarea resorbției osoase.

De menționat că hormonul de creștere, hormonul paratiroidian (PTH), insulina și vitamina D influențează deopotrivă creșterea și metabolismul osos la nivel molecular prin stimularea sintezei de collagen, osteocalcină și alte fosfoproteine. La nivel celular, acești hormoni afectează procesele de depozitare și degradare matriceală, iar la nivel tisular interferează raportul de cuplare resorbție (osteoliză) – formare (osteosinteză).

- Cortizonul și glucocorticoterapia prelungită, tiroxina și PTH favorizează resorbția osteolitică. Cortizonul reduce osteoformarea prin inhibarea sintezei de collagen, diminuarea absorbției calciului cu creșterea tranzitorie a calciuriei. Excesul de glucocorticoizi, prin inhibarea osteoformării, reduce masa osoasă (osteoporoza indusă de cortizol) în paralel cu efectele hipocalcemice sus-menționate și întârzierea creșterii (boala Cushing, hipercorticism terapeutic etc.).

- Hormonii sexuali (estrogeni, androgeni, anabolizante de sinteză) favorizează cu precădere osteoformarea.

- Androgenii stimulează maturația scheletului și creșterea, probabil prin favorizarea anabolismului proteic, sugerând implicarea lor în puseul de creștere postpubertar. Hiperandrogenismul, prin sudarea prematură a cartilajelor de creștere, ar explica statura redusă a subiecților.

- Estrogenii prezintă efecte mai reduse, dar dozele mari accelerează maturarea scheletului.

Factori nutriționali – metabolici: aportul nutritiv normal de protide, calciu și fosfor, alături de vitaminele C și D ar favoriza osteoformarea și creșterea osoasă, dat fiind rolul lor în organizarea colagenică a matricei extracelulare (vitamina C) și în mineralizare (vitamina D).

Insuficiența sărurilor fosfo-calcice și a vitaminei D în timpul creșterii, cu un nivel scăzut al fosfatului extracelular, favorizează resorbția osoasă, inhibarea creșterii, reducerea rezistenței mecanice osoase, cu apariția deformărilor osoase de tip rahitic (curbări, torsionări etc). Hipocalcemia alimentară și avitaminoza C sunt însoțite

de osteoporoză, iar hipofosfatemia prin avitaminoză D împiedică mineralizarea osteoidului, ducând la osteomalacie și rahitism. Majoritatea dezechilibrelor metabolice grave și a celor atașate unor boli cronice încheiesc dezvoltarea scheletului.

Factori circulatori: tulburările vasomotorii, în special cele de natură simpatică, determină apariția unei osteoporne algie posttraumatice. Influența factorilor circulatori este mai complexă decât formula „Iuperemia determină demineralizare, iar staza o hiperformare osoasă”.

Factori genetici: influența lor este corelată cu definitivarea în condiții normale a formelor spre sfârșitul maturării osoase și apariția în condiții anormale a unor osteopatii „genotipice”.

Vârsta: osul suferă modificări structural-funcționale pe tot parcursul vieții. Copilăria este marcată prin predominanța compușilor organici de tipul oseinei, care asigură elasticitatea oaselor în raport cu proporția crescută a mineralului, iar bătrânețea, printr-o creștere a mineralului, având drept urmare o creștere a fragilității și, în consecință, a frecvenței fracturilor.

În țesutul osos spongios osteoformarea diminuează odată cu vârsta adultă, iar resorbția osoasă rămâne stabilă și antrenează o osteoporoză lentă, progresivă.

Factori biomecanici de solicitare fizică: ortostatismul și locomotia determină la nivelul osului o stare de tensiune și eforturi unitare prin acțiunea unor factori mecanici reprezentați de greutate, tonus, contracție, tracțiune, torsiune, compresie etc. Aceștia acționează asupra arhitecturii osului conform cerințelor de statică și locomotie.

Mișcarea, presiunile, tracțiunile pe direcții paralele la liniile de forță ale structurilor osoase sunt factori mecanici necesari pentru viabilitatea osului în sensul stimulării activității osteoblastice. Imobilitatea și neutralizarea mișcării favorizează procesele de osteoliză și determină osteoporoza.

Țesutul osos are tot atâtă nevoie de exercițiu ca și țesutul muscular. Consolidarea unei fracturi, cel puțin în prima fază, impune însă o strictă imobilizare.

Imobilizarea completă și prelungită a unui segment de membru (din poliomieliță sau TBC osteo-articular) poate încetini creșterea în lungime a unui os, grăbind dispariția cartilajelor sale de conjugare.

Imobilizarea prelungită (la pat), starea de imponderabilitate (zboruri spațiale) care evoluează cu un bilanș negativ al calciului, demineralizarea, rarefaciile osoase și apariția de calculi renali pun problema intervenției factorilor mecanici (gravitație, tracțiune musculară) în reglarea echilibrului calcic în os.

Există presiuni favorabile formării osului (presiuni funcționale), evaluate între 8 și 15 kg/cm². Exercițiul unei astfel de presiuni determină orientarea sistemelor haversiene după traiectul tensiunii principale, în timp ce fibrele de collagen oferă o mare rezistență prin orientarea lor.

În regenerarea și structurarea țesutului osos și a osului-organ, alături de factorii mecanici un rol aparte l-ar juca și factorii de electrogeneză osoasă ca „inductni de ghidaj” al proceselor de mineralizare.

Bioelectricitatea osoasă. Atât remodelarea, cât și procesele reparative scheletice sunt însoțite de importante modificări ale potențialelor electrice zonale generate de proprietățile piezoelectrice ale osului.

Activitatea electrică osoasă include, pe de o parte, *potențiale generate de întindere* (de natură piezoelectrică) și, pe de altă parte, *biopotențiale membranare*.

– Potențiale generate de întindere apar în timpul defirmării prin mobilizarea sarcinilor electrice fixate pe moleculele de collagen în matricea mineralizată. Zona de compresie devine electronegativă în raport cu cea tensionată, argumentând caracterul de sursă piezoelectrică a osului.

– Biopotențiale membranare: sunt produse de electrogeneza celulelor osoase.

18.2.2. OSUL CA ORGAN FUNCȚIONAL

Ca organ, osul este format dintr-o varietate de țesuturi, dintre care cel osos este majoritar, la acesta alăturându-se variante de țesut conjunctiv (cartilaginos, fibros etc.), țesut adipos, medular și vascular. Prin structurarea și individualizarea morfo-funcțională a acestora, osul devine un organ cu atribuții și funcții distincte în cadrul sistemului osteo-articular, în special, și al aparatului locomotor, în general.

18.2.2.1. Caracteristici structural-funcționale

a) **Țesutul osos.** Osul, ca amestec a două variante de țesut osos (cortical și spongios) cu implicații funcționale diferite, prezintă o organizare arhitecturală strict legată de aranjamentele interne ale acestora.

Țesutul cortical (lamelar) este de tip haversian, având ca unitate funcțională osteonul sau „sistemul lamelar haversian”, cu un diametru de aproximativ 150 μm. Acesta este format dintr-o succesiune de lamele concentrice, situate în jurul unui canal central (haversian), dispus paralel cu axul osului și care conține arteriole, venule și nervi. Comunicarea osteonului la cavitatea medulară se face printr-un sistem de canale transverse (Volkmann).

La nivelul sistemului lamelar haversian sunt localizate osteocitele, interconectate prin canalicule care permit vehicularea nutrienților și hormonilor spre canalul central haversian, pentru schimburi metabolice și ionice.

Osteoanele variază în timp și spațiu în ceea ce privește gradul de mineralizare, cele mai vechi și canalul central conținând predominant săruri minerale, în raport cu cele tinere sau zonele periferice. La periferie, osteoanele sunt delimitate de o linie de ciment intercelular cu conținut mare în GAG și proteine non-cologene.

În cadrul proceselor de osteoformare apar succesiv osteoanele primare la nivelul barelor cartilaginoase calcificate sau în osul excavat, cu înlocuirea lor de către osteoanele secundare în procesele de remodelare de la nivelul tunelelor de resorbție (vezi „conurile de tăiere”).

Sistemele lamelare non-haversiene sunt organizate la nivelul trabeculelor diafizei, canalului medular și al zonei dintre osteoane, incluzând suprafețele internă și externă ale osului delimitate de lamele circumferențiale.

Distribuția țesutului osos compact și a celui spongios lamelar în arhitectura amintită depinde de implicațiile funcționale ale osului.

Țesutul compact este prezent în oasele implicate în realizarea funcției de susținere (plante, bazin) sau de mișcare (părghii osoase diafizare).

Țesutul spongios asigură o rezistență crescută la un minim de material distribuit trabecular conform direcțiilor de solicitare, presiune și/sau tracțiune și, în acest fel, susținerea și protecția unor organe.

La nivelul osului lung există o arhitectură care înmăsoare trei suprafețe distincte (periostică, haversiană și endostală), delimitate de două membrane: periostul la exterior și endostul la partea internă.

Endostul delimitează spre canalul medular conținutul măduvei osoase, fiind captușit de un bogat pat vascular, de celule endoteliale, capilare și fibre reticulare.

Suprafața haversiană, alcătuită din pereți lacunari și canaliculari mărginiți de osteocite, participă alături de suprafața endostală la homeostazia mineralului osos.

Un rol important în schimburile ionice îl joacă și sistemul de membrane (periost, endost), care, prin gradientele electrolitice create, menține o distribuție diferită a electrolitilor și proteinelor în compartimentul structurilor osoase, cel interstițial și cel plasmatic vascular.

b) **Măduva osoasă.** Cavitățile osoase conțin țesutul hematopoietic reprezentat de măduva roșie. Aceasta participă atât la generarea elementelor figurate sanguine, cât și la procesele de nutriție, formare și creștere a oaselor prin conținutul mare în osteoblaste, osteoclaste, vase sanguine și nervi.

Asemeni osului în ansamblu, ca organ modificabil cu vârsta, măduva roșie suferă variații cantitative și calitative începând de la naștere și copilărie (unde ocupa locul major), cu transformarea ei în măduvă galbenă în timpul creșterii (localizată în oasele lungi) și, în final, în măduvă cenușie la vârstnici, unde, în paralel, se produce și transformarea oaselor în structuri rigide și casante.

c) **Rețeaua vasculară osoasă.** Osul este un organ bogat vascularizat (aproximativ 10% din debitul cardiac). Sursele sanguine variază în raport cu forma și mărimea osului, dar pentru un os lung luat ca model irigația sanguină provine din patru sisteme distincte: (1) artera nutritivă; (2) artera metafizară; (3) artera epifizară; (4) arterele periostice (atrofiate la adult).

În condiții normale, fluxul arterial prin osul cortical este centrifug (endosto-periostic) și invers pentru cel venos. Sistemul circulator periostal în special constituie o rezervă cu un debit minim în condiții normale, care crește după fracturi sau distrucții medulare.

Sistemul venos medular prezintă o capacitate de 6-8 ori mai mare decât cel arterial și joacă rol de „poartă de intrare” a tinerelor celule sanguine generate în sistemul hematopoietic medular.

d) **Rețeaua nervoasă somato-vegetativă.** Considerat ca un veritabil organ funcțional, sistemul osos scheletic primește o importantă rețea de fibre nervoase, senzitive și vegetative, care pătrunde în os împreună cu rețeaua vasculară. Țesuturile periarticulare și periostul sunt prevăzute cu o inervație senzitivă bine reprezentată, ceea ce explică sindroamele algice din anumite afecțiuni ale aparatului locomotor (reumatoide, traumatice, neoplazice etc.).

18.2.3. FUNCȚIILE SISTEMULUI OSOS

Osul ca organ izolat sau în ansamblul sistemului scheletic îndeplinește o serie de funcții, din care o mare parte cu semnificație biomecanică, iar altele au o semnificație biologică propriu-zisă.

Funcțiile mecanice. Privesc rolul de susținere, rezistență statică și dinamică, a părghiiilor osoase în realizarea posturii și mișcării ca parte pasivă a aparatului locomotor.

a) **Funcțiile de susținere și protecție** sunt asigurate prin proprietățile de rezistență și elasticitate ale structurilor osoase care servesc ca:

- suport pentru cap, trunchi și extremități;
- punct de inserție a tendoanelor musculare și ligamentelor;
- adăpost pentru organele interne (toracice și pelvine), creier, măduva spinării și organele de simț.

b) **Funcțiile de postură și locomotie** sunt posibile datorită asamblării sub formă de părghii a oaselor lungi și scurte. Acestea sunt conectate prin articulații mobile, fiind puse în mișcare de către dispozitivul motoric neuro-muscular generator de forță, lucru mecanic și mișcare, ca bază a înregulului comportament motor, creșterii, maturării și perfecționării locomotiei umane.

Funcții biologice. Sunt relevate prin locul ocupat de sistemul osos în ansamblul morfogenezei, evoluției filo- și ontogenetice a organismului în general și a aparatului locomotor în special.

a) Definitivarea și menținerea formei corpului uman se realizează prin programarea genetică a osteoformării și adaptarea metabolismului pentru sintezele componentelor osteo-articulare.

b) Participarea la metabolismul mineral se face prin rolul de depozit mineral și zonă de schimb ionic, restructurarea organo-minerală și asigurarea homeostaziei fosfo-calcice.

c) Participarea în hematopoieză și apărarea organismului sunt posibile prin conținutul în măduvă roșie generatoare de elemente figurate sanguine și particularitățile microrețelelor vasculare de la nivelul structurilor osoase.

18.2.4. ELEMENTE DE MORFO-FIZIOLOGIE ARTICULARĂ

Asamblarea pieselor osoase ale scheletului pentru a forma dispozitivul pasiv al aparatului locomotor este realizată prin intermediul unor formațiuni anatomo-funcționale denumite articulații.

În acest cadru, articulația se prezintă ca un organ de unire a două sau mai multe piese osoase, mobilitatea și funcționalitatea lor fiind strâns legate de geometria și organizarea structurală a componentelor anatomice.

Articulațiile sunt clasificate în trei tipuri: (1) fibroase; (2) cartilaginease; (3) sinoviale.

1) **Articulațiile fibroase** sunt din punct de vedere structural „sinartroze”, care permit o mișcare minimă (suturi craniene, articulația tibio-peronieră distală).

2) **Articulațiile cartilaginease** sunt „amfiartroze”, cu mobilitate moderată (simfiza pubiană, articulațiile intravertebrale).

3) **Articulațiile sinoviale** sunt grupate sub numele de „diartroze” și prezintă o mare mobilitate (articulațiile centurilor, radio-carpene, interfalangiene).

În articulațiile sinoviale, extremitățile osoase sunt acoperite de cartilaj articular și scăldate de lichidul sinovial, care conferă o fricțiune redusă și o rezistență crescută la forțele (compresie, tracțiune) generate de gravitație sau activitatea musculară.

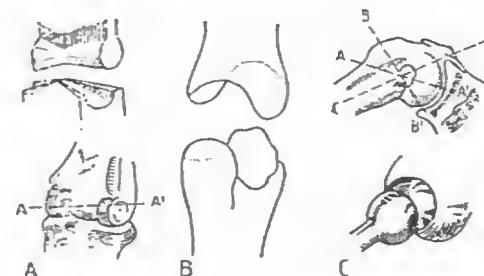


Fig. 18.1. Tipuri de articulații. A: Articulații uniaxiale. B: Articulații biaxiale. C: Articulații pluriaxiale.

Întreaga articulație este învelită de o capsulă articulară străbătută de vase și nervi și acoperită de o membrană sinovială.

În cadrul celor trei categorii de articulații este plasată totalitatea sistemului de interconectare osoasă, care prezintă particularități structural-funcționale adaptate locului și rolului în postură și locomotia umană.

După numărul de piese articulare, articulațiile pot fi: (1) simple (interfalangiană); (2) compuse (articulația cotului); (3) complexe (articulația rotuliană); (4) combinate (articulația temporo-mandibulară).

După formă și gradul de libertate, ele se clasifică în:

1) **articulații uniaxiale** (plane sau cilindroide), unde mișcarea se execută într-un singur plan (apofizele articulare cervicale) sau asemănător balamalelor (articulația cotului), aceasta putând fi de flexie, extensie, rotație medială sau laterală (fig. 18.1);

2) **articulații biaxiale** (elipsoide și selare), care au libertatea mișcărilor în două sensuri (flexie-extensie și lateralitate), mișcarea de rotație nefiind posibilă (articulația radio-carpiană sau carpo-metacarpiană);

3) **articulații pluriaxiale** (articulații sferoidale sau anartroze), numite și total libere, și la care orice mișcare este permisă, adică flexie, extensie, mișcări de lateralitate, adducție și abducție, rotație și circumducție. Exemplele clasice sunt date de articulațiile scapulo-humerală și coxo-femurală.

18.2.4.1. Caracteristici morfo-funcționale generale

Componente articulare. O articulație de tip *diartroză* prezintă toate elementele unei articulații clasice (extremități osoase, cartilaje articulare, capsulă articulară), fiecare dintre ele având o structură și un rol funcțional particular.

Extremitățile osteo-articulare. Sunt formate din țesut osos spongios, cu travee orientate în direcția liniilor de forță și separate de cartilajele articulare printr-o lamă osoasă subcondrală.

Nivelul de inserție al mușchilor periarticulari joacă un rol preponderent în modelarea extremităților, arhitectura trabeculelor de la nivelul acestora ilustrând în mod evident legătura dintre structură și funcție. Buna funcționare a articulațiilor este legată de adaptarea perfectă a suprafețelor osteo-articulare prin care liniile de forță se transmit, păstrând aceeași direcție, de la o suprafață la alta.

Cartilajul articular. Este reprezentat de o formațiune cartilagineasă hialină, puternic hidratată (70-80% apă), netedă, lucioasă, umedă și ușor albastruie. Este considerat filogenetic ca cea mai veche structură a organismului care și-a păstrat individualitatea bisto-morfologică.

Particularitățile structural-funcționale. Cartilajul articular (lipsit de pericondru) are o structură neomogenă, care variază morfologic, ca mărime și orientare intramatriceală a controcitelor și fibrelor de colagen.

Secreția celulelor B sinoviale adaugă proteoglicani, enzime și acid hialuronic.

Alături de rolul său *lubrifiant*, lichidul sinovial are un important rol *nutritiv*, ca și de *curățire* a unor deșeurii. În acest sens, cartilajul articular poros trăiește în cea mai mare parte datorită imbibității cu lichid sinovial printr-un mecanism deja prezentat la cartilajul articular.

18.2.4.2. Articulația ca unitate funcțională

Ca organ ce conține componente anatomice distincte morfologic și funcțional, articulația devine o unitate funcțională integrată în sistemul scheletic atașat celui neuro-muscular atât prin elementele informaționale senzitivo-senzoriale, cât și prin cele efectoare musculo-tendinoase.

Inervația capsula-sinovială este de o importanță particulară date fiind:

1) rolul formațiunilor nervoase articulare în postură, locomotie și kinestezie (vezi analizatorul kinestezic);

2) senzațiile durernase și acțiunile reflexe care însoțesc orice atrofie.

Inervația articulară provine din sistemul nervos somatic, prin nervii spinali, și din sistemul vegetativ, prin terminațiile simpatiche postganglionare vasomotorii care însoțesc vasele sanguine. Zonele capsulare sunt cel mai puternic inervate senzitiv, încât articulația apare ca un veritabil organ senzorial periferic.

Fibrele nervoase aferente conțin: *terminații propriiceptive* (corpusele Ruffini și mici corpusculi lamelari) la nivelul capsulei și ligamentelor, cu rol în postură și în mișcare și *terminații libere*, cu sediul în planul capsulo-ligamentar, sensibile la torsiune și întindere.

Componentele articulare și musculo-tendinoase se găsesc în raport de strânsă interdependență adaptativă și funcțională. Membrana sinovială „secretă” lichidul sinovial, acesta hrănește cartilajul și protejează osul; ligamentele orientează mișcarea, mușchii o produc, mișcarea fiind necesară pentru viața osului și a cartilajului.

În acest sens, amintim două principii esențiale care rămân valabile în înțelegerea fiziologiei și patologiei locomotiei:

1) articulația este unică și ea reacționează ca un organ ale cărui componente sunt intim legate morfo-funcțional;

2) articulația este multiplă, ea fiind constituită din diverse țesuturi, ale căror structură și reacție trebuie bine cunoscute pentru a aprecia limitele normalului funcțional.

Explorarea sistemului osteo-articular în cadrul aparatului locomotor va ține seama atât de aspectul general al regiunii examinate (aspectul tegumentelor, temperatura, volumul articulației și al musculaturii, sensibilitatea), cât și de statica și dinamica articulară. Anumite deformări ale regiunii atrag după ele o deviație a axelor articulare și o schimbare în orientarea suprafețelor articulare, cu răsunet asupra mobilității, staticii și locomotiei (vezi locomotia umană).

În ce privește dinamica articulară, se va urmări gradul de conținere ligamentară a extremităților articulare, apariția hiperlaxității, gradul de mobilitate articulară pasivă și activă.

Mărimea și volumul spațiului articular, structura componentelor articulare, cât și forma extremităților se modifică pe măsură ce articulația își realizează funcția. În plus, acomodarea sinovialei are loc pe întreaga gamă a mișcărilor articulare fiziologice, prin întinderea sau compresia viloizităților din fundurile de sac articulare.

Mobilitatea articulară: după planul în care articulația asigură direcția mișcării segmentelor osoase, are loc o grupare a mișcărilor după cum urmează: a) mișcări în plan frontal (orizontal) – flexie și extensie; b) mișcări în plan sagital (vertical) – adducție și abducție; c) mișcări giratorii (de rotație); d) mișcări circulare (de circumducție).

Rolul funcțional al articulațiilor în organism: articulația joacă un triplu rol:

1) postural, prin participare la menținerea poziției corpului;

2) kinetic, prin deplasarea unor segmente în raport cu altele;

3) locomotor, prin deplasarea corpului în ansamblu în spațiu.

În îndeplinirea funcției locomotorii, este necesară o coordonare unitară a articulațiilor prin intermediul elementelor active neuro-musculare, care asigură adaptarea amplitudinii mișcărilor segmentare la realizarea

diverselor posturi și mișcări. Date suplimentare privind componentele active neuro-musculare vor fi expuse în capitolele următoare.

18.3. MUSCULATURA SCHELETICĂ LA NIVELUL ÎNTREGULUI ORGANISM

18.3.1. ORGANIZAREA MACROSCOPICĂ A MUSCULATURII SCHELETICE

Un număr de aproximativ 600 de mușchi scheletici acoperă 40–45% din greutatea corporală.

În jurul fiecărei fibre musculare se află țesut conjunctiv denumit *endomisium*, care conține vase de sânge și nervi. Mai multe fibre musculare prezintă un înveliș comun format din fibre de collagen dense, numit *perimisium*. Țesutul conjunctiv care organizează fibrele sub forma mușchiului ca organ se numește *epimisium*. Cele trei straturi conjunctive se află în continuitate și la capătul mușchiului formează *tendoanele*. Aranjamentul fibrelor musculare în mușchi este variabil, după cum urmează:

1) fibre paralele cu axul lung al mușchiului (pectineu, biceps brahial). Acești mușchi au capacitatea de a se scurta pe distanțe mari;

2) fibre oblice față de axul lung al mușchiului, cu mai multe variante: unipennat (flexor propriu al policelui), bipennat (drept anterior), circumpennat (tibial anterior), multipennat (deltoid). Acești mușchi dezvoltă rapid forță pe distanțe mici;

3) fibre cu aranjament radial sau triunghiular (mic pectoral, lung adductor).

Mușchii care dezvoltă o forță mare, dar la care gradul scurtării este limitat, prezintă o structură multipennată, cu tendoanele dispuse în septuri multiple pe două planuri.

Acest aranjament face ca diametrul transversal efectiv să fie mult mai mare decât cel anatomic. La nivelul mușchiului deltoid aceste septuri se dezvoltă în perioada embrionară și se reduc la vârste înaintate, justificând ipoteza conform căreia structura macroscopică a mușchiului este adaptată dinamic la necesitățile funcționale.

Pentru a-și putea realiza funcția, mușchii sunt atașați de la un os la altul prin tendoane sau aponevroze, trecând peste una sau mai multe articulații. Punctele de atașare musculară proximală și distală se numesc origine și, respectiv, inserție, cea din urmă aflându-se de obicei pe osul mobilizat de mușchi.

Tendoanele sunt formate din țesut conjunctiv flexibil, dar practic inextensibil, care joacă rol de intermediar în transmiterea forței musculare la schelet.

Filamentele de collagen ale tendoanelor se întind pe suprafața fibrelor musculare, realizând un contact strâns cu acestea. Mărimea tendonului depinde de cea a mușchiului de care aparține, existând un anumit unghi între axul fibrelor musculare și cel al tendonului. Acest unghi, care nu depășește 10–20°, previne ruperea tendonului ca urmare a creșterii diametrului muscular în timpul contracției. Unghiurile mari caracterizează mușchii penanți.

Lungimea fibrei musculare între tendoane este de obicei mult mai mică decât lungimea totală a mușchiului și proporțională cu gradul scurtării. În condiții fiziologice, scurtarea maximă a fiecărei fibre este menținută în anumite limite (circa 30% din lungimea normală a mușchiului). Aceasta ar putea explica relația între tensiunea maximă dezvoltată de mușchi și lungimea sa.

Forța și mișcarea generate de un mușchi depind de activitățile individuale integrate în timp ale unităților motorii componente. Pentru o mișcare fină se utilizează un număr redus sau chiar o singură unitate motorie. Creșterea forței de contracție se realizează prin intrarea în acțiune a mai multor unități motorii, simultan cu creșterea numărului de impulsuri nervoase eferente. Gradarea activității musculare este determinată astfel de activarea asincronă a unităților motorii din întregul mușchi.

Mușchiul luat ca întreg prezintă un spectru de viteze de contracție și relaxare. Mușchii globului ocular au un timp de contracție de 7,5 ms, de 5 ori mai mic decât gastrocnemianul (40 ms) și de 12 ori mai mic decât solearul (90 ms). Acest componenț se explică prin raportul variabil din componența mușchii lui.

Realizarea oricărei mișcări implică participarea mai multor mușchi, care sunt denumiți *agoniști*, *sinergiști* și *antagoniști*. Mușchiul care produce acțiunea se numește agonist, iar cel care se opune acesteia,

antagonist. Mușchii sinergiști acționează în același sens, dar nu pot realiza separat mișcarea respectivă. Antagonistul este, de obicei, inhibat reflex atunci când agonistul este pus în mișcare (exemplu: când bicepsul brahial este tensionat pentru ridicarea unei greutăți în palmă, tricepsul brahial este relaxat).

Nu toți mușchii striati acționează în cadrul deplasării sau al menținerii posturii. Unii dintre ei înconjură orificii (buză, pleoape, anus) și au rol de sfinciere. În două treimi superioare ale esofagului se află mușchi striati care contribuie la realizarea deglutiției. Diafragma este un mușchi striat care, prin lărgirea toracelui și compresia abdomenului, participă la realizarea inspirului.

Există, de asemenea, mușchi cu cel puțin o inserție cutanată, cum ar fi mușchii faciali ai mimicii.

18.3.2. INERVAȚIA MUSCULARĂ

Spațiile dintre fibrele musculare sunt străbătute de o rețea de nervi somatici motori și senzitivi, al căror loc de pătrundere este denumit „punct motor”. Majoritatea fibrelor vegetative (simpatice și parasimpatice) merg la mușchi pe calea plexurilor perivascularare.

18.3.2.1. Inervația senzitivă

Sensibilitatea musculară sesizează starea tonică și nivelul funcțional al mușchilor sau prezența unor influențe nociceptive (dureroase), în vederea informării diferitelor etaje ale axului cerebro-spinal.

Atât mușchii, cât și tendoanele sunt prevăzute cu o importantă rețea nervoasă senzitivă atașată unor formațiuni receptoare (fusuri neuro-musculare, corpusculi tendinoși Golgi), grupate funcțional în dispozitivul propriocepției kinestezice.

Informația kinestezică de întindere este preluată de la nivelul fusului neuro-muscular prin intermediul a două tipuri de fibre senzitive, cunoscute sub numele de *aferențe primare (anulo-spirale)* și *aferențe secundare (în buchet)*.

Terminațiile primare sunt fibre aferente de tip Ia de conducere rapidă, care se înfășoară în jurul regiunii ecuatoriale a fibrelor intrafusale cu sac nuclear și a celor cu lanț nuclear.

Terminațiile secundare senzitive (de tip II) abordează extremitățile fibrelor intrafusale, probabil ale celor cu lanț nuclear.

Studii de electrofiziologie au precizat că terminațiile senzitive primare semnalează atât lungimea instantanee a mușchilor, cât și viteza cu care aceștia sunt întinși; terminațiile secundare senzitive indică doar lungimea instantanee.

Fusul neuro-muscular mai primește și un număr variabil de *fibre simpatice*, sosite pe traiectul vaselor, precum și *terminații nervoase ciliare* aferente pentru transmiterea sensibilității dureroase a mușchiului.

Proprioceptorii tendinoși, denumiți corpusculi Golgi sau „organe tendinoase”, sunt prevăzuți cu o rețea sinuoasă de terminații nervoase plasate în intimitatea fasciculelor tendinoase. Prin intermediul unor fibre senzitive de tip Ib de conducere rapidă, informează centrul medular asupra tensiunii la care este supus tendonul, declanșând la o anumită limită de întindere o relaxare bruscă a mușchiului (reflex miotatic invers).

18.3.2.2. Inervația motorie

La realizarea acesteia participă trei formațiuni: nervii motori (axonii neuronilor motori); joncțiunea neuro-musculară (placa motorie); unitatea motorie.

Nervii motori. Sunt reprezentați de fibre nervoase eferente ale sistemului nervos somatic, distribuite prin rețeaua de nervi cranieni și rahidieni.

Fibrele motorii rahidiene au originea în cornul anterior al măduvei, fiind considerate *calea finală comună* a căilor motorii cu originea în zona frontală ascendentă. Cornul anterior medular conține două tipuri de neuroni motori (alfa și gamma) (fig. 18.2).

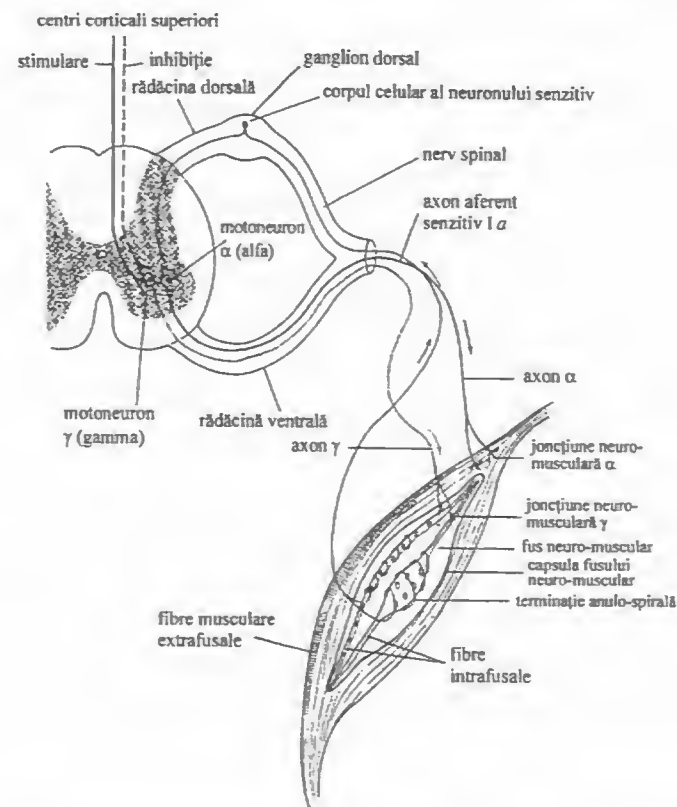


Fig. 18.2. Reflexul gamma. Fibrele musculare striate extrafusale ale mușchiului sunt inervate de axonii ai motoneuronilor α . Fibrele intrafusale ale fusului neuro-muscular sunt inervate de motoneuronii γ . Fusul neuro-muscular este inervat de asemenea de fibre senzitive la care fac sinapsă direct pe motoneuronii α . Motoneuronii γ sunt controlați la nivel central de către centrul nervos superior.

– *Motoneuronii alfa* au diametrul axonal între 8–12 μm . Acționează direct asupra contracției musculare, asigurând inervația fibrelor musculare striate propriu-zise (extrafusale) prin intermediul a două tipuri de neuroni: fazici și tonici:

- motoneuronii *fazici* inervează fibrele musculare cu contracție rapidă (motoneuronii ai mișcării);
 - motoneuronii *tonici* deserveț fibrele musculare cu contracție lentă (motoneuronii ai tonusului).
- *Motoneuronii gamma* inervează fibrele intrafusale ale proprioceptorilor fusali, implicați în controlul mușchilor.

Fibrele intrafusale primesc două tipuri funcționale de inervație:

- *aferențe gamma-dinamice*, cu terminații în placă pe fibrele cu sac nuclear, având rol în sensibilizarea fusului la viteza de întindere;

• *eferențe gamma-stafice*, terminate cvadrilat pe fibrele cu lanț nuclear, ai căror stimuli măresc sensibilitatea fusului la extensia susținută.

În prezent se discută și despre existența unei inervații de tip *beta*, care ar face oficiul de acord fin al cuplului funcțional *alfa-gamma* prin servomecanismul fusului neuro-muscular.

Unitatea motorie. Fiecare fibră nervoasă prezintă numeroase ramificații axonale terminale care abordează izolat un număr de fibre musculare. Celula nervoasă musculară, împreună cu fibrele musculare înervate de ramificațiile sale axonale constituie *unitatea motorie*, considerată drept unitate morfo-funcțională a sistemului neuro-muscular.

După Sherrington, mușchiul cu nervul lui motor trebuie considerat ca un ansamblu de unități motorii.

Numărul de fibre musculare pe unitatea motorie este dependent de poziția anatomică și funcțională a mușchilor.

Mușchii implicați în controlul unor mișcări fine (mușchii motori ai globilor oculari) sunt constituiți din unități motorii cu un număr redus de fibre (10 *per* U.M.), în timp ce mușchii atașați unor mișcări grosiere (mușchii posturali) prezintă un număr mare de fibre *per* U.M. (peste 2 000 de fibre).

Fibrele musculare din unități motorii diferite prezintă raporturi de strânsă vecinătate, astfel încât un fascicul muscular nu conține neapărat fibrele dintr-o unitate motorie unică. În acest fel, stimularea unei unități motorii va determina o contracție ușoară și extinsă la o zonă musculară mai largă, în locul unei contracții puternice limitate la un punct.

Joncțiunea neuro-musculară (placa motorie). Cu rare excepții, fiecare fibră musculară este în contact cu o singură fibră nervoasă terminală. Această zonă de contact, situată în partea mijlocie a fibrei musculare, corespunde unei diferențieri a sarcolemei care, împreună cu terminațiile axonale, constituie *joncțiunea neuro-musculară*.

Prin cercetări de microscopie electronică, histo-chimice și electro-fiziologice, s-au putut contura caracteristicile joncțiunii neuro-musculare, care prezintă elemente pre- și postsinaptice.

Elementul presinaptic este reprezentat de extremitatea ramificației axonale. La contactul cu fibra musculară terminația pierde teaca de mielină și se continuă la nivelul sarcolemei cu membrana conjunctivă lfenle, de care este separată prin membrana axonală a *butanilor terminali* sinaptici. Aceștia conțin numeroase mitocondrii și mici vezicule, de 200–300 Å, cu rol în stocarea și eliberarea *acetilcolinei* (mediator colinergic), implicată în transmiterea sinaptică a mesajului motor contractil.

După spațiul sinaptic, de 400–800 Å, se află elementul postsinaptic, reprezentat de sarcolema fibrei musculare, mai îngroșată la nivelul joncțiunii, unde ia denumirea de *placă motorie*. Aceasta prezintă multiple invaginări, sub forma unor repliuri, care formează *aparatur subneural* *Cauteaux*.

La acest nivel, placa motorie conține numeroși *receptari calinergici* și *receptori enzimatici* (acetilcolinesterazici), care prin degradarea corespunzătoare a ACh asigură o transmitere sinaptică normală (fig. 18.3).

Cercetări de microscopie electronică și bisto-chimie au arătat prezența unor concentrații mari de *acetilcolinesterază* la nivelul aparatului subneural *Cauteaux*, ca și în membrana axoplasmică presinaptică.

Alte particularități privind placa motorie și transmiterea neuro-musculară a mesajului motor vor fi prezentate la descrierea contracției musculare.

18.3.3. PARTICULARITĂȚI ALE CONTRACȚIEI MUSCULARE ÎN ORGANISM

Contracția musculară reprezintă principala forță internă implicată în realizarea mișcării, la producerea căreia participă: transmiterea neuro-musculară a mesajului, cuplul excitație-contracție, sistemul contractil și sistemul energogen.

Ca o consecință a excitabilității neuro-musculare, contracția modifică lungimea inițială a structurilor musculare, antrenând dezvoltarea unor forțe tensionale statice sau dinamice, cu antrenarea componentelor osteo-articulare în actul locomotor.

Se vor expune aspecte particulare privind contracția la nivelul organismului, consecințele funcționale legate de travaliul static și dinamic, randamentul contracției, forța musculară și factorii care o condiționează, cfortul și oboseala musculară.

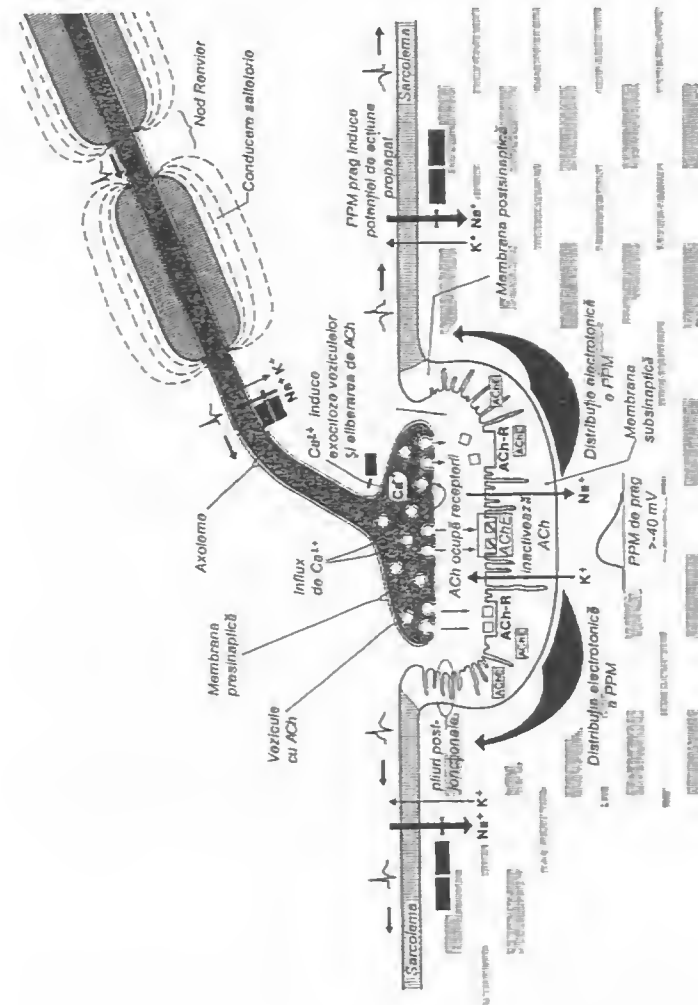


Fig. 18.3. Transmitere neuro-musculară. ACh, acetilcolină. AChE, colinesterază. ACh-R, receptorul colinergic. PPM, potențial de placă motorie.

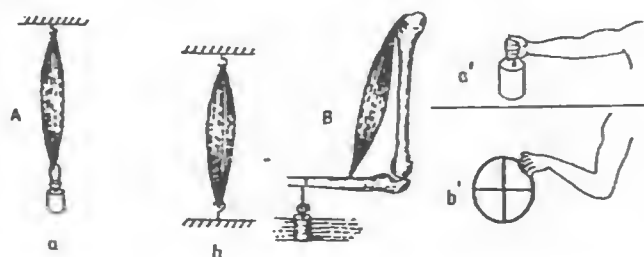


Fig. 18.4. Activitatea contractilă în organism. A: Tipuri de contracție. (a) contracție izotonică, (b) contracție izometrică. B: Travalu muscular (a', b').

18.3.3.1. Tipuri de contracții musculare

Contracția musculară voluntară este rezultatul unei sumări de secuse individuale, având ca rezultat apariția *contracției tetanice*. În organism se întâlnesc în special contracții de tip tetaniform, cele unice, de tipul secusei, însoțind doar unele reflexe proprioceptive (miotatic).

Înregistrarea concomitentă a activității electrice (sub forma unor salve de potențiale de nmitate motorie) și a celei mecanice reflectă natura contracției tetanice.

După cum contracția mușchiului este însoțită de scurtarea sa și deplasarea segmentelor osoase cu păstrarea stării tonice sau de o creștere a tensiunii fără modificarea lungimii sale, contracțiile au fost denumite *izotonice* și, respectiv, *izometrice* (fig. 18.4):

a) *contracția izometrică* (mobilitate 0) nu furnizează travaliu după datele clasice, deși menținerea unei anumite poziții egale cu învingerea forței gravitaționale echivalează cu un travaliu static.

Mușchii antigravitaționali sau mușchii masticatori în momentul sfărâmării alimentelor efectuează contracții izometrice, care se însoțesc de un consum energetic crescut, iar travaliul efectuat duce rapid la oboseală (fig. 18.5);

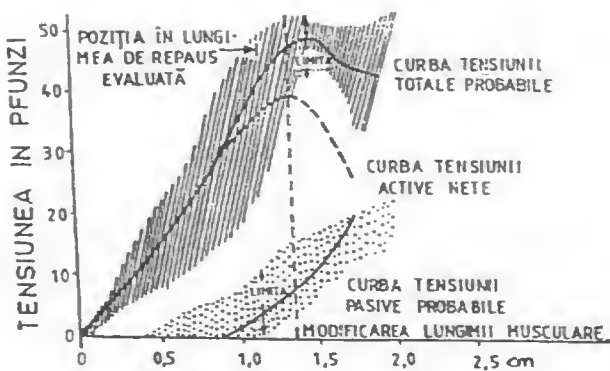


Fig. 18.5. Relația izometrică lungime-tensiune.

b) *contracția izotonică* declanșează mișcări prin aplicarea forței unui vector, furnizând astfel un travaliu „dinamic”.

Contracțiile izotonice însoțesc deplasarea membrilor în procesul de mers, în ridicări de greutate și în realizarea mișcărilor în spațiu;

c) *contracția în alungire* este un al treilea tip de contracție, care apare atunci când forța ce se opune mișcării depășește forța musculară și întinde mușchiul.

În ce privește dezvoltarea musculaturii, contracțiile izometrice au ca rezultat creșterea volumului și greutatei musculare (în consecință, a forței), în timp ce în contracțiile izotonice forța se modifică foarte puțin.

18.3.3.2. Forța musculară

Tracțiunea maximă pe care o poate dezvolta un mușchi contra unei rezistențe definește forța musculară, variabilă între 3,6–10 kg/cm² la tracțiunea transversală (de la 13 la 48 de ani).

Legată în principal de puterea contractilă a mușchiului, forța este direct dependentă de suprafața de secțiune, dispoziția paralelă a fibrelor musculare, viteza de contracție raportată la sarcină, temperatură, gradul de oboseală și starea de nutriție.

Alături de acești factori, forța de contracție este dependentă de lungimea normală a mușchiului în poziția sa de alungire maximă, ca și de caracteristicile mecanice ale sistemului de pârghii osoase (modul de inserție a mușchilor, structura articulației).

Asupra unora dintre factorii urmăriți se impun câteva precizări:

a) *Lungimea inițială a mușchiului*. Lungimea normală a unui mușchi în poziția de întindere maximă corespunde forței maxime de contracție. Atât scurtarea progresivă, cât și alungirea peste limite normale alterează forța de contracție.

Această constatare atrage atenția asupra existenței unei lungimi inițiale optime, care corespunde lungimii „naturale” sau lungimii de repaus a mușchiului.

Până la acest punct, forța de contracție crește proporțional cu alungirea, peste el începe să scadă, conform unei curbe de relație lungime-tensiune (fig. 18.6).

b) *Rezistența opusă mușchiului (sarcina)* și *viteza de scurtare*. Forța exercitată de un mușchi în contracție este exprimată de relația dintre viteza de scurtare și sarcină. În cazul unui mușchi izolat, viteza de contracție este cu atât mai mare, cu cât rezistența opusă este mai mică și diminuează progresiv când sarcina sau rezistența cresc. Viteza este maximă când sarcina este zero, iar, în cazul în care aceasta depășește posibilitățile de ridicare, viteza devine 0, dezvoltându-se o tensiune izometrică maximă.

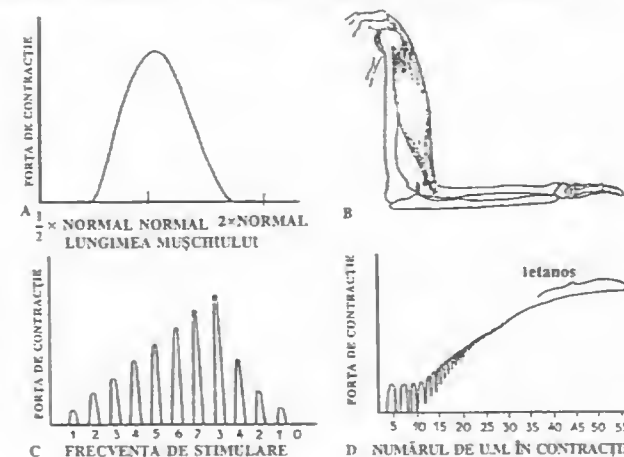


Fig. 18.6. Mecanisme de creștere a forței musculare. A: Lungimea inițială a mușchiului. B: Sistemul de pârghii osoase. C: Sumarea unităților motorii. D: Sumarea progresivă (în valuri) a contracțiilor, prin creșterea frecvenței de stimulare (Guyton, 1974).

Limitările anatomice ale articulațiilor, inserțiile mecanice pe părțile osoase, ca și rezistența mușchilor antagoniști modifică mult gradul de scurtare și forța dezvoltată în contracție.

Astfel, în afară de influența sarcinii și vitezei de mișcare, forța musculară dezvoltată depinde de lungimea brațului de pârghie, lungimea brațului de rezistență, inerția, unghiul de tracțiune al mușchiului în raport cu pârghia, gradul lui de întindere, acțiunea mușchilor sinergici și antagoniști.

c) **Adaptarea forței de contracție.** În cadrul eforturilor voluntare, forța de contracție musculară poate fi modificată prin sumarea spațială sau temporală a unităților motorii. Intrarea asincronă în acțiune a unităților motorii evită apariția contracțiilor de tip secusă musculară și permite fluenta mișcărilor lente.

Când forța este menținută constantă în timpul unui efort prelungit, are loc un proces de activare a SNC, determinând o mai bună sincronizare și o mobilizare optimă a unităților motorii.

d) **Evaluarea forței și travaliului muscular.** Forța poate fi calculată prin înmulțirea suprafeței de secțiune a mușchiului (exprimată în cm^2 - Sf) cu lungimea fibrelor din timpul scurtării (exprimată în metri - S) și înmulțită cu 10:

$$F = Sf \times S \times 10$$

Travaliul muscular poate fi determinat din raportul între forța dezvoltată supra deplasarea respectivă (în care forța este echivalentă cu sarcina care trebuie deplasată), forța fiind egală cu masa înmulțită cu accelerația.

Valoarea absolută a forței musculare a unui organism nu poate fi măsurată, dat fiind mulții factori de care depinde.

În schimb, cuplul exercitat asupra unei articulații poate fi apreciat prin variate dispozitive, ca: dinamometre, tensiometre, ergografe, cicloergometre și alte tehnici care fac obiectul unor metode de explorare funcțională neuro-motorie.

18.3.3.3. Oboseala musculară

Oboseala diminuează excitabilitatea, pnterea și durata în timp a contracției musculare, prin scăderea numărului de unități motorii antrenate în actul motor.

De asemenea, amplitudinea fiecărei contracții este diminuată de oboseală, atât prin scăderea numărului de fibre musculare stimulate, cât și prin reducerea capacității de scurtare a fiecărei fibre.

Alături de semnul caracteristic al oboselei musculare, definit prin diminuarea reversibilă a activității sale, se poate adăuga diminuarea preciziei mișcărilor și apariția unei tremurături (consecință a oboselei nervoase).

Oboseala musculară este favorizată de o depășire a limitelor normale de activitate musculară printr-un efort prelungit și susținut. Cât privește prevalența mecanismului nervos sau muscular (chimic) al oboselei, discuțiile rămân deschise.

O primă teorie acordă fenomenelor chimice (epuizarea rezervelor energetice și creșterea deșeurilor acide: acid lactic) rolul principal în diminuarea randamentului mușchiului obosit, considerând că unele modificări electrice din mușchi și nerv sunt secundare.

Teoria nervoasă consideră că la nivelul scoarței cerebrale oboseala musculară este resimțită sub forma unei senzații specifice, care are drept consecință diminuarea numărului și frecvenței descărcărilor în neuronii motori (fig. 18.7).

Lucrurile se complică dacă ținem seama că mușchiul obosit prin contracții voluntare răspunde prin contracții la stimulare electrică directă a nervului său motor. În plus, mușchiul obosit prin excitații directe sau indirecte își reia activitatea mai repede în mediu alcalin, prin administrare de adrenalină sau excitarea nervilor simpatici (fenomenul Orbelli).

Observațiile constatate sugerează o succesiune diferită în apariția fenomenului de oboseală: primii sunt afectați neuronii motori din scoarță, apoi placa neuro-musculară și în cele din urmă mușchiul propriu-zis. Toate acestea pledează pentru un mecanism complex, în care fenomenul de oboseală este o rezultantă a ansamblului de modificări biofizice și chimice apărute la diversele relee ale dispozitivului motor neuro-muscular.

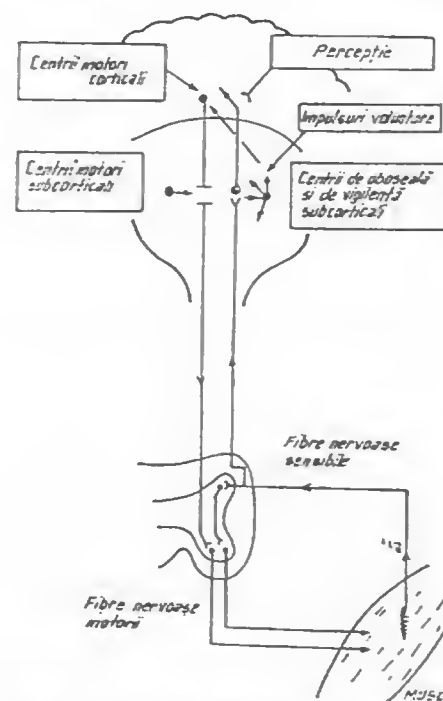


Fig. 18.7. Mecanisme ale oboselei musculare: teoria nervos-centrală (după Grandjean).

18.3.4. METABOLISMUL MUSCULAR

Atât activitatea bazală, de refacere a structurilor funcționale celulare prin biosinteză, cât și activitatea tonică necesită un consum energetic permanent pe seama unui aport adecvat de O_2 și substanțe bogate în energie (glucide și lipide).

18.3.4.1. Consumul de oxigen

Celula musculară consumă o cantitate considerabilă de O_2 , care este stocat intracelular pe o cromoproteidă sarcoplasmatică (mioglobină). Aceasta îl fixează reversibil într-o cantitate de 350 ml în raport cu rezerva totală de 1 000 ml existentă în organism (600 ml în sânge și 50 ml intracelular).

Evaluarea simultană a lucrului mecanic al unui mușchi în activitate (W) și a consumului de O_2 pe baza căruia se calculează energia calorică eliberată (Q) permite calcularea randamentului activității musculare (coeficient de activitate utilă W/Q).

Acesta are o valoare de 20-30%, fiind realizat la temperatura corpului printr-un proces chimiodinamic și nu termodinamic (care ar necesita o temperatură de peste 100 grade Celsius). Astfel, mușchiul reprezintă o mașină termică ideală în care energia chimică se transformă direct (nu prin intermediul căldurii) în energie propulsoare contractilă și în alte forme de energie (electrică, termică, osmotică).

18.3.4.2. Substratul energetic

În activitatea normală, de repaus și efort moderat, 2/3 din energie este asigurată de lipide și 1/3 de glucide, pentru ca, în efortul susținut, majoritatea energiei să fie furnizată pe seama glucidelor.

În eforturile epuizante și de scurtă durată (metabolism de tip anaerob), activitatea musculară este întreținută pe seama glucozei, în calitate de carburant energetic esențial, în timp ce lipidele sub formă de AGL sunt utilizate în efortul prelungit de intensitate moderată, în care oxigenul este pe deplin disponibil pentru catabolizarea oxidativă a acizilor grași la nivelul mitocondriilor.

Problema consumului suplimentar de oxigen din perioada recuperării nu este pe deplin elucidată; se știe că aceasta nu are nici o legătură cu reconstituirea glicogenului muscular sau procesele de eliminare a acidului lactic rezultat din activitatea musculară.

18.3.4.3. Formarea și stocarea compușilor fosfat-macroergici

Specializată pentru producerea lucrului mecanic, fibra musculară striată își asigură energia necesară activității contractile prin scindarea în special a ATP.

Fosfocreatina este considerată un rezervor important de grupări fosfat-macroergice necesare menținerii concentrației de ATP pentru aportul direct de energie. Acesta se reface ulterior pe seama glicolizei predominant aerobe.

Intensitatea reacțiilor glicolizei în metabolismul muscular explică abundența în sarcoplasmă a unor enzime implicate în acest proces: fosforilazele a și b, fosfoglucomutaza, fosfofructokinaza, aldolaza, trifosfat izomeraza, fosfoglicerinaldehid dehidrogenaza etc. Alte enzime implicate în ciclul Krebs și în procesele de oxido-reducere sunt localizate în mitocondriile fibrelor musculare (sarcozomi).

Menționăm un grup de enzime specializate în transferul grupărilor fosfat cu rol important în metabolismul muscular: ATPaza, miokinaza și creatin fosfokinaza, ale căror implicații sunt tratate pe larg în manualele de biochimie.

Cât privește localizarea și originea ATPazelor musculare, una ar fi asociată miozinei la nivelul extremităților punților transversale și alta ar fi atașată unei proteine ce conține fosfolipide și are localizare sarcoplasmatică.

Un fapt important de semnalat este că mușchiul nu conține glucozo-6-fosfatază, fapt ce explică lipsa intervenției directe a țesutului muscular în reglarea glicemiei.

În repaus, mușchiul degajă o cantitate de căldură, care exprimă energia chimică necesară menținerii structurilor moleculare ale aparatului contractil și sarcoplasmatic, precum și polarizarea membranelor excitabile.

18.3.5. TROFICITATEA MUSCULARĂ

Stimularea permanentă a nervului prin influxurile nervoase centrale sau pe cale electrică menține țesutul muscular într-o stare de funcționare și troficitate direct legate de nivelul activității locomotorii a organismului.

Influențe tonice slabe sunt suficiente pentru menținerea mușchiului într-o stare normală, în timp ce dispariția influxului nervos de la nivelul medular sau nervos central antrenează în scurt timp o atrofie a fibrelor musculare.

Cu cât un mușchi funcționează mai mult, cu atât cresc forța și dimensiunile sale.

Contractia izometrică, de intensitate suficientă pentru a influența antrenamentul, își găsește energia într-un mecanism anaerob, irigația mușchiului într-o astfel de contracție fiind puternic diminuată sau chiar suprimată, ceea ce afectează aportul normal de O_2 . Totuși, astfel de exerciții cresc puterea mușchilor interesați prin creșterea puterii contractile a fiecărei fibre, dar nu se știe dacă aceasta rezultă din mărirea de volum pe seama creșterii sarcoplasmului, a numărului sau dimensiunii miofibrilelor.

Exercițiile izotonice soliciită mecanismele transportoare de O_2 pentru favorizarea hipertrofiei mușchilor, durificării lor, fără să modifice semnificativ forța musculară.

Hipertrofia musculară este însoțită, în general, de o creștere a eficienței contracției musculare.

Hipertrofia rezultă în urma activității musculare intense, chiar dacă această activitate se exercită doar câteva minute pe zi (ca în cazul exercițiilor zilnice de gimnastică).

La nivelul mușchiului hipertrofiat s-a identificat o cantitate mai mare de glicogen, substanțe lipidice și alte nutrienți de rezervă.

Se pare că procesele de excitare nervoasă ar facilita transportul de nutrienți prin membrana fibrei musculare, de unde și rolul trofic al proceselor fizioterapeutice de stimulare electrică a unor grupe musculare afectate în vederea recuperării și păstrării integrității funcționale.

18.4. POSTURA ȘI LOCOMOȚIA UMANĂ

Datorită continuei perfecționări a aparatului locomotor, pe de o parte, și a sistemului nervos, pe de altă parte, organismele animale au ajuns să dispună de posibilități din ce în ce mai complexe de statică și locomoție.

Corpul uman a suferit în această evoluție modificări morfo-fiziologice substanțiale, permițându-i trecerea la postura și locomoția bipedă, în care stațiunea verticală a schimbat complet cadrul de relație socio-biologică între om și mediul înconjurător.

Definirea posturii și locomoției umane este determinată în acest sens de capacitatea aparatului locomotor de a menține stațiunea verticală bipedă (funcția de postură și echilibru) și de a deplasa diferitele sale segmente și întregul corp (funcția kinetică), ambele funcții fiind realizate prin participarea componentelor musculo-osteo-articulare.

Cele două funcții sunt inseparabile și se condiționează reciproc, astfel încât orice postură se menține sau se schimbă printr-o mișcare, după cum și orice mișcare pornește de la o postură armonioasă și perfect coordonată. Condiționarea lor reciprocă este perfect reflectată în evoluția ontogenetică a posturii și locomoției umane. Separarea lor va fi făcută doar din punct de vedere didactic, urmărindu-se o mai bună sistematizare și prezentare a datelor.

18.4.1. MECANISME GENERALE ALE POSTURII

Pornind de la constatarea că orice activitate motorie începe dintr-o anumită poziție (postură) și se termină în alta, descifrarea mecanismelor generale ale locomoției nu se poate concepe fără cunoașterea prealabilă a celor de poziționare statică sau postură.

Termenul de „poziție”, în sensul său fiziologic, desemnează o anumită orientare a corpului în spațiu (de exemplu, stațiunea bipedă) sau a unor părți din corp în raport cu altele (de exemplu, brațul întins). Amintim, spre exemplu, pozițiile fiziologice de clinostatism (decubit dorsal și ventral) sau de ortostatism (stațiunea verticală). La acestea se adaugă diverse poziții (stând pe un picior, pe genunchi, ghemuit, șezând, stând pe mâini sau sprijinit culcat), întâlnite obligatoriu în executarea unor activități motrice sau impuse în diverse exerciții de cultură fizică.

Poziții particulare pot fi observate în diverse boli în care corpul afectat se găsește în atitudini antalgice sau create de procesul patologic în plină evoluție.

Mijloacele kineziterapeutice actuale, asociate diverselor procedee electro- și mecanofizice ce au ca scop recuperarea unor defecțiuni ale diferitelor segmente ale aparatului locomotor, intră în preocuparea centrelor de reeducare și recuperare funcțională și presupun o cunoaștere amănunțită a elementelor de postură și locomoție.

Mai mult, înainte de utilizarea recuperării se impune evitarea apariției unor deformări în statica și locomoția umană prin utilizarea pozițiilor corecte în diverse condiții de muncă.

Studiul acestor poziții și obținerea unui randament maxim al muncii prestate fac obiectul unei științe relativ tinere pe plan mondial, cunoscută sub numele de *ergonomie*. Aceasta furnizează principiile generale privind organizarea muncii și a locurilor de muncă, pozițiile fiziologice direct legate de o funcționare optimă a aparatului locomotor uman, proiectarea adecvată a utilajelor implicate în procesul producției.

Adeesea, menținerea poziției se găsește în conflict cu forța gravitațională (stațiunea bipedă) și acest fapt pune în joc mecanisme de conservare a echilibrului și restaurare a sa în cazul perturbării, încât mecanismele care stau la baza realizării posturii sunt implicate cu cele ale menținerii echilibrului static și dinamic.

18.4.1.1. Criterii anatomo-biomecanice și fiziologice ale stării de postură

În studiul unei anumite poziții de fond se va respecta obligatoriu tratarea următoarelor probleme: descrierea generală a poziției; segmentele intrate în joc; baza de susținere și centrul de greutate; unghiul de stabilitate și dispozitivele de echilibru; grupele musculare principale, ca dispozitive active, alături de mijloacele de stabilizare pasivă și acțiunea pârghiilor osteo-articulare, ca dispozitive pasive ale aparatului locomotor. Se pot adăuga la această analiză și diversele activități locomotorii și statice în care aceste poziții ar fi implicate cu maximum de eficiență.

Descrierea poziției diferitelor segmente. Fiecare stare posturală impune o descriere a poziției segmentelor implicate și a raporturilor dintre ele, precizându-se în grade unghiurile unui segment față de celălalt, precum și planurile (orizontal, frontal, sagital) în care se găsesc acestea în pozițiile de flexie, extensie, rotație, abducție sau adducție, supinație sau pronatie etc.

Baza de susținere (poligonul de sustentare). Este o suprafață geometrică variabilă, delimitată fie de marginile exterioare, fie de punctele prin care segmentele corpului omenesc iau contact cu solul.

În unele situații, poate fi practic redusă la un punct (sprijinul pe vârful piciorului din balet) sau la o linie (patinajul sau mersul pe sărmă). Menținerea echilibrului devine cu atât mai dificilă, cu cât baza de susținere își diminuează suprafața.

Poziția centrului de greutate. Determinarea acesteia se face luând în considerație locul centrului de greutate și greutatea fiecărui segment în parte.

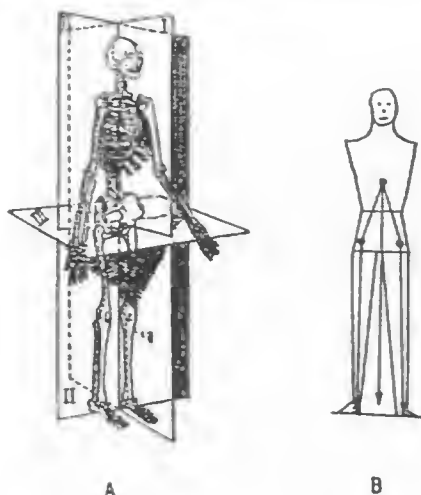


Fig. 18.8. Poziția ortostatică bipedă. A: Planuri de orientare: (I) medio-sagital; (II) frontal; (III) transversal (orizontal). B: Proiecția centrului de greutate în poligonul de susținere (Kendall).

Spre exemplu, la un individ cu o greutate totală de 58,71 kg, pentru segmentul de trunchi cu o greutate de 25,6 kg poziția mijlocie a centrului de greutate a acestuia este localizată la nivelul feței anterioare a vertebrei L₁.

Cunoscând pozițiile mijlocii ale centrelor de greutate și greutatea a două segmente vecine izolate, se poate găsi centrul de greutate al ambelor segmente reunite. Plasarea lui se află pe linia dreaptă care unește centrele de greutate parțiale la o distanță de acestea invers proporțională cu greutatea segmentelor considerate (fig. 18.8).

Prin combinarea din aproape în aproape a centrelor de greutate ale diferitelor părți ale corpului, se poate găsi poziția centrului de greutate al întregului corp aflat într-o poziție oarecare.

Unghiul de stabilitate. Este format de proiecția centrului de greutate cu dreapta care îl unește cu marginea bazei de susținere. Cu cât acest unghi este mai mare, cu atât stabilitatea devine mai mare. Teoretic, unghiul de stabilitate este cu atât mai mare, cu cât centrul de greutate este situat mai jos, iar baza de susținere mai mare. Practic, acest unghi nu are o valoare indicativă absolută, proiecția centrului de greutate deplasându-se pe diversele puncte ale suprafeței bazei de susținere.

Mecanisme posturale. Diverse poziții sau stări posturale se mențin datorită travaliului static al grupelor musculare, prin contracțiile lor izometrice, declanșate și reglate prin reflexele de postură (vezi activitatea reflexă a măduvei spinării).

Unul din reflexele esențiale în menținerea posturii și echilibrului este reflexul de extensie (miotot), dezvoltat în particular la nivelul mușchilor extensori (posturali). Mecanismele de postură reflexe și de echilibru sunt provocate de stimuli de origine diferită, informațiile fiind primite de la organele proprioceptive ale urechii interne (labirintice) privind poziția capului în spațiu, de la proprioceptorii musculaturii gâtului asupra poziției capului față de trunchi, de la proprioceptorii musculaturii trunchiului și membrilor (fusurile neuro-musculare) asupra poziției membrilor în spațiu, de la receptorii retinieni vizuali asupra poziției întregului corp față de corpurile înconjurătoare și de la exteroceptorii cutanați care intră în contact cu punctele de sprijin ale corpului pe sol sau cu obiectele înconjurătoare (vezi funcțiile senzitive ale SNC) (fig. 18.9).

Toate aceste informații ajung la diferite etape ale axului cerebro-spinal (măduvă, trunchi cerebral, nucleii cenușii centrali, scoarță cerebrală și cerebel), declanșând o serie de reacții care pot fi sintetizate în: reacții statice locale, reacții statice segmentare și reacții statice generale (după Magnus). Acestea dirijează întreg travaliul static general în vederea menținerii pozițiilor adecvate impuse de anumite circumstanțe (vezi reglarea generală a posturii și locomotiei). Deși elementul de bază în mecanismul posturii este reflex, participarea centrilor superiori corticali este indispensabilă, cum o dovedește, de altfel, imposibilitatea stațiunii verticale în cazul pierderii conștienței (vezi funcțiile motorii ale SNC).

După cum s-a mai precizat, menținerea pozițiilor (posturii) nu este posibilă fără menținerea echilibrului corpului, care rezultă tot din intrarea în acțiune a reflexelor posturale.

Conform legii echilibrului, starea de echilibru se realizează atunci când proiecția verticală a centrului de greutate al corpului cade în interiorul bazei de susținere. Stabilitatea poziției este cu atât mai mare, cu cât proiecția centrului de greutate este mai apropiată de centrul bazei de susținere. Poziția anormală a capului în spațiu modifică percepțiile senzoriale la nivelul retinei și labirintului, determinând reflexe de redresare a mușchilor cefei, care readuc capul și, succesiv, corpul în poziție normală. Astfel, mecanismul de echilibru intrinsec cu cel de postură pune în joc o mare parte a musculaturii scheletice și numeroși centri ai sistemului nervos central (vezi reglarea tonusului de postură, analizorii și SNC).

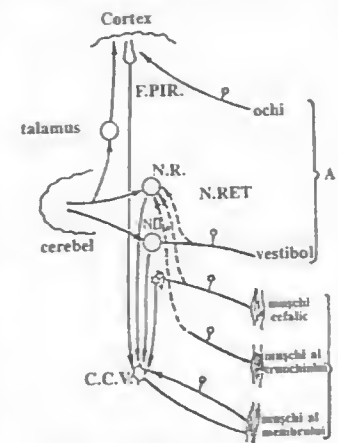


Fig. 18.9. Mecanisme tonogene generale. A: Elemente receptoare (senzitiv-senzoriale). F.P.I.R., fasciculi piramidali. N.R., nucleul roșu. N.RET., nucleul reticulat. ND, nucleul dințat. B: Elemente de execuție (neuro-motorii). C.C.V., centrii coordonatori ventrali. (Guyton, 1974).

Grupele musculare posturale principale. Practic, la realizarea și menținerea oricărei poziții intervin toate grupele musculare ale corpului, dar cu precădere grupul extensorilor intervine și cu efectuarea unui travaliu static. Toate grupele agoniste și antagoniste acționează ca niște cupluri de forță, neutralizându-se reciproc, însă, întotdeauna, în fiecare poziție intră în acțiune cu predominanță anumite grupe musculare, particulare în realizarea acelei posturi.

Mijloacele de stabilizare pasivă și participarea pârghiilor osteo-articulare. În realizarea posturii există o colaborare strânsă între dispozitivul activ muscular și cel pasiv tendino-ligamento-osteo-articular. Astfel, dintre mecanismele de stabilizare pasivă, un rol deosebit revine echilibrului intrinsec al coloanei vertebrale, capsulei și ligamentelor unor articulații hiperextinse, punerea sub tensiune a fasciilor și aponevrozelor sau intrarea în contact a unor segmente osoase care blochează mișcarea.

În baza principiilor biomecanicii și anatomiei funcționale, în cadrul lanțurilor cinematice închise (memebre pe care se sprijină corpul în menținerea poziției respective), pârghiile osteo-articulare acționează ca pârghii de gradul I, de sprijin; în cadrul lanțurilor cinematice deschise (memebre libere, fără sprijin), pârghiile osteo-articulare acționează ca pârghii de gradul III, de viteză.

18.4.2. POZIȚIA ORTOSTATICĂ BIPEDĂ

Trecerea la stațiunea bipedă și plantigradă a omului primitiv a reprezentat unul din primele salturi care l-a diferențiat de antropoide. Regiunea lombo-sacrată a devenit locul principal de întâlnire a două forțe cu acțiune contrară, care mențin corpul în poziție de echilibru: pe de o parte, greutatea masei corporale, ca forță tinzând să coboare centrul de greutate, și, pe de altă, forța musculară și cea ligamentară, care tind să-l mențină într-o poziție adecvată necesităților de viață.

În stațiunea bipedă, centrul de greutate este localizat la încrucișarea planului dorso-sacral, care trece prin partea superioară a celei de-a doua vertebre lombare (L_2), cu planul medio-frontal.

Văzut din față, firul cu plumb se suprapune planului medio-sagital și cade în mijlocul bazei de susținere, reprezentată de o suprafață trapezoidală, limitată de marginile externe ale plantelor.

În sprijinul biped, centrul de greutate principal mai are doi centri secundari, plasați în mijlocul articulațiilor coxo-femorale, astfel încât proiecția lor cade în zonele plantare unde va mai la mijloc și mai înapoi lor.

Aparatul locomotor al omului s-a adaptat, astfel, în stațiunea bipedă poziției ortostatice, considerată ca fundamentală pentru statica și dinamica lui. Această poziție a deplasat în primul rând acțiunea gravitației asupra membrilor superioare. Obligația impusă picioarelor și gambelor de a suporta greutatea corpului a dus la dezvoltarea și întărirea acestor elemente. Pelvisul s-a adaptat, de asemenea, la stațiunea verticală, deși într-o manieră incompletă, în timp ce trunchiul a suferit o angulație la nivelul articulației lombo-sacrate, care reprezintă o zonă de extremă slăbiciune pe plan mecanic.

În plus, apar modificări structurale ale organelor de susținere, în special așezarea traveelor osoase, care s-au orientat în direcție verticală, după liniile principale de forță ce acționează vertical asupra corpului omenesc.

Modificările morfologice din această evoluție au antrenat și schimbări corespunzătoare la nivelul sistemului nervos central, legate de menținerea echilibrului postural în fața forțelor gravitaționale, modificând în aceeași măsură comportamentul biologic printr-o largă viziune câștigată odată cu trecerea la stațiunea bipedă.

Mecanisme posturale ortostatice. Ca rezultat al unui ansamblu de reflexe posturale și de redresare, poziția ortostatică este menținută prin dispozitivele de reglare posturală menționate anterior, pe baza informațiilor primite de la proprioceptorii musculari, tendinoși, ligamentari și articulari (gradul de tensiune, întindere și presiune), de la receptorii labirintici și cei retinieni, care înștiințează creierul asupra poziției corpului în fiecare moment (vezi analizorii, mecanismele de reglare posturală).

Ca mijloc activ de stabilizare ortostatică pe baza reflexului miotatic (dezvoltat în special la nivelul mușchilor extensori), mecanismul de menținere a stațiunii bipede se realizează prin rezistența opusă greutatei corpului, care tinde să flecteze genunchii și șoldurile. Aceasta atrage după sine întinderea

extensorilor, stimularea fusurilor neuro-musculare, contracția reflexă a extensorilor care fixează genunchii, restabilind poziția ortostatică. În stațiunea verticală bipedă, forței greutatei corpului i se opun nu numai forța activă a mușchilor, ci și cea pasivă a formațiunilor capsulelor ligamentare și a dispozitivului osteo-articular în ansamblul său.

Ca mijloc pasiv de stabilizare ortostatică, acesta acționează prin pârghiile de gradul I ale membrilor inferioare, ca lanțuri cinematice închise, iar prin cele de gradul III ale membrilor superioare, ca lanțuri cinematice deschise, intervenind în mod complementar la realizarea celor mai diverse acte motorii particulare poziției bipede.

Numeroase cercetări privind stațiunea verticală au putut demonstra că un om echilibrat convenabil în poziție verticală prezintă o activitate musculară scăzută la nivelul trunchiului și al coapselor. Explicația acestor constatări surprinzătoare stă în poziția scheletului, ligamentelor și părților moi, în așa fel încât un echilibru tranzitoriu și instabil poate fi asigurat în mod pasiv. Aportul acestuia poate suplini parțial sau total stabilitatea creată de dispozitivul activ muscular în unele cazuri patologice, cum ar fi paralizile poliomiolitice. Această poziție verticală pasivă nu poate fi menținută și subiectul ar cădea dacă nu ar interveni activitatea musculară (un paraplegic nu poate sta în picioare). De îndată ce intervine o pierdere de echilibru apar reacțiile musculare compensatoare complexe care să-l restabilească; în acel moment, contracția musculară încetează, până la apariția unui nou dezechilibru.

Un om în poziție verticală pasivă poate cădea în orice direcție: înainte, înapoi sau într-o parte. Mușchii care se opun căderii, în special cei din grupul extensorilor, joacă un rol antigravitațional. În funcție de direcția căderii, acest rol antigravitațional îi revine unuia sau altuia din mușchii trunchiului sau membrilor. Atunci când corpul se apleacă în față, extensorii trunchiului și flexorii gambei se contractă cu o forță suficientă pentru a restabili echilibrul, ca urmare a unor reflexe miotatice declanșate și coordonate de un veritabil dispozitiv kinestezic cuplat analizatorilor vestibular și vizual. Când, dimpotrivă, corpul se răstoarnă în spate, se contractă marii drepti abdominali și extensorii gambei, în timp ce o înclinare laterală antrenează un răspuns controlateral al oblicilor.

Aceste răspunsuri sunt de origine reflexă și rezultă din influxul provenit, în parte, de la receptori de întindere din trunchi și membrele inferioare și, în parte, de la receptori cefalici, mai ales ai ochilor. Se constată apoi că stațiunea verticală cu ochii închiși este puțin stabilă, fiind însoțită de oscilații ale trunchiului. Această observație poate ușor dovedi că aferențele vizuale joacă un rol important în menținerea reflexă a staționării verticale la om.

Aspectele prezentate converg la ideea că reglarea posturii normale la corpul intact depinde, în consecință, de activitatea integrală a tuturor mecanismelor reflexe pe care le-am amintit. Fiecare celulă a cornului ventral este un punct de convergență; la acest nivel se opresc fibrele provenind de la numărăse rădăcini dorsale și cele provenite de la toate nivelurile trunchiului cerebral și ale măduvei spinării. Postura este normală atunci când activitatea acestor căi convergente este coordonată în mod convenabil. Menținerea unei poziții și mișcările de adaptare destinate să restabilească echilibrul pun în joc o mare parte a musculaturii scheletice și numeroase zone din axul cerebro-spinal, care vor fi discutate mai pe larg la funcțiile motorii ale SNC. În acest sens, rămâne valabilă afirmația că postura este baza mișcării, astfel încât, prin intermediul acesteia, plecând de la o postură se ajunge totdeauna la o altă postură. Datele prezentate, corelate într-un concept de analiză anatomo-biomecanică, fac obiectul unor preocupări de specialitate ortopedică și recuperatională privind patologia staticii și locomotiei umane, ele fiind tratate pe larg în cadrul acestor discipline.

18.4.3. MECANISMELE GENERALE ALE LOCOMOTIEI

Impusă de interacțiunea permanentă și sub cele mai diverse forme cu mediul înconjurător, mișcarea corporală în ansamblu sau a diferitelor sale segmente reprezintă unul din mijloacele principale de relație și adaptare continuă a organismului la condițiile mereu schimbătoare ale mediului. Implicit, se poate explica astfel gradul înalt de diferențiere a mișcării în evoluția animală, care este particulară fiecărei specii conform cu modul său de viață, fapt evidențiat și în cadrul dezvoltării motorii din viața intrauterină. Încă din acest stadiu, ființa umană are reflexul absolut al necesității de a se mișca.

Nou-născuțul vine pe lume cu o activitate motorie de bază și o dotare în mișcări dezordonate care, ulterior, se vor putea individualiza în rapori cu evoluția sa.

În primele săptămâni de viață, oul-născuțul prezintă chiar un „mers automat tip primar”, în cazul în care este susținut de axile. Acesta dispare și reapare abia către sfârșitul primului semestru sau chiar al primului an de viață, sub forma unui automatism condiționat. În tot acest interval, se instalează o stare de astazie, caracterizată prin absența echilibrului în poziție ortostatică. Când staționează bipedă este pe deplin câștigată, la 4-5 ani, se poate vorbi de un început al educației motorii.

În acest caz, schemele motorii în vederea însușirii unor mișcări elementare, legate de universul focă limitat al copilului care se dezvoltă în cursul primilor 3 ani de viață, sunt condiționate de forțele gravitaționale, în particular, și de mediul înconjurător (spațiu, suprafață, obiecte), în general.

18.4.3.1. Noțiuni generale de dinamică și cinematică locomotorie

Locomoția – deplasarea, mișcarea în seos biomecanic – apare ca o modificare a poziției corpului, în general, sau a unor părți din acesta, în particular. Apelând la principiile mecanicii în analiza funcției de locomoție, se pleacă de la tratarea aspectelor dinamice și cinematice ale acesteia. Studiul dinamic al genezei mișcării este legat de forțele care colaborează la realizarea cuplului de mișcare, cât și de factorii de care depinde dezvoltarea acestor forțe.

Studiul cinematic se referă la stabilirea reperelor de mișcare, a direcțiilor și amplitudinii acestora în diverse planuri și în raport cu diferite axe biomecanice, cât și a diferitelor cupluri și lanțuri cinematice dezvoltate la nivelul aparatului locomotor.

Analiza dinamică și cinematică a locomoției este completată cu enunțarea unor principii generale de biomecanică morfo-funcțională.

Biodinamica locomoției. Mișcările care realizează locomoția corpului omenesc sunt rezultatul acțiunii combinate a unui ansamblu de componente biomecanice active și pasive, care fac parte integrantă din alcătuirea aparatului locomotor. În acest sens, activitatea statică posturală, cât și cea dinamică locomotorie sunt asigurate de intrarea în joc, pe de o parte, a unor elemente anexate aparatului locomotor (receptori, nervi, centri oervoși) și, pe de altă, a unor componente proprii ale acestuia (mușchi, pârghii osoase, articulații).

Realizarea actului motor propriu-zis impune participarea obligatorie a tuturor componentelor amintite, iar fixarea și specificitatea acestuia sunt condiționate de ordinea succesiunii în timp a unor evenimente informaționale și efectoare, începând cu mesajul senzitiv, mesajul motor (voluntar sau reflex), contracția musculară și terminând cu mobilizarea sau fixarea pozițională a componentelor osteo-articulare.

Astfel, o mișcare poate fi declanșată voluntar printr-un mesaj senzitiv, particular vizual, care inițiază suita ulterioară de evenimente în ordinea amintită. În cazul unei mișcări reflexe, de redresare, are loc o anteoare inițială a componentelor osteo-articulare, cu solicitarea ulterioară a receptorilor de întindere fusali și tendinoși declanșatori ai unui mesaj senzitiv inconștient, urmat de succesiunea celorlalte evenimente în ordinea citată mai sus, până la mobilizarea sau fixarea pozițională favorabilă actului motor impulsiv.

O parte din evenimentele amintite (geneza și conducerea mesajului senzitiv și a celui motor) este tratată în cadrul funcțiilor senzitive și motorii ale SNC; în acest context, se vor face doar referiri strict legate de interacțiunile lor în organismul luat ca un tot unitar. Din acest punct de vedere, se revine asupra unor aspecte privind contracția musculară în organism, ca principală forță motrice, alături de acțiunea pârghiilor osoase și mobilizarea osteo-articulară, ca elemente mecanice definitorii ale funcției locomotorii.

Coordonarea acțiunilor musculare în locomoție. Fie că sunt implicați în realizarea mișcărilor voluntare, semivoluntare sau reflexe, în exercitarea unui act motor intervin, în afara mușchilor principali (agoniști), și alte grupe musculare, din care deosebim:

- **motorul primar** este mușchiul care controlează efectuarea continuă și gradată a mișcării conform legii Sherrington (vezi SNC);
- **mușchii de fixare** susțin segmentul în poziția cea mai utilă, conferind forța mișcării;
- **mușchii neutralizatori** sunt antagoniștii care suprimă mișcarea secundară a „motorului principal”, intervenind după terminarea mișcării. Interacțiunea dintre mușchii sinergici și antagoniști mărește suplețea și precizia mișcării, care crește odată cu creșterea numărului de mușchi antrenați în mișcare. Cu cât

relaxarea antagoniștilor este mai mare, cu atât mișcarea este mai rapidă și mai puternică. Cu cât direcția tracțiunii se îndepărtează de normală, cu atât este mai important rolul sinergicilor în controlul orientării. Astfel, problema intervențiilor musculare în actul motor devine și mai complexă, joind seama atât de funcționarea globală sau zoolă a unora din mușchi, cât și de participarea coordonată a unor lanțuri de grupe musculare. Acestea, prin acțiuni armonice sincronizate într-o anumită succesiune, dezvoltă totreg ansamblul de mișcări particulare unei anumite activități motorii, în vederea menținerii unei poziții, sau executării unei deplasări ori a unui travaliu în cele mai variate circumstanțe.

Ca dispozitiv activ al aparatului locomotor, mușchii scheletici asigură diversele activități ale acestuia prin capacitatea lor de contracție de tip *izotonic* sau *izometric*, producând fie deplasări ale pârghiilor pasive osoase în contextul unor mișcări, fie menținerea unei anumite poziții a acestora în cadrul activității posturale. În timp ce, în condițiile întregului organism, contracțiile sunt obținute în majoritatea cazurilor de ambele tipuri și în special sub forma lor fuzionată de secuse multiple – cunoscute sub denumirea de *tetanos* și generate prin impulsurile oervoase reflexe sau voluntare, contracția mușchiului izolat se obține cu ajutorul excitației directe sau indirecte a preparatului gastrocnemian (de broască). Se pot înregistra în acest caz, cu ajutorul unor miografe, începând de la secusa simplă (izotonică sau izometrică), până la contracția fuzionată imperfect sau perfect, de durată și amplitudine diferite, în raport cu felul excitației, durata, amplitudinea și frecvența de aplicare.

Acțiunea pârghiilor osoase. Scheletul poate fi considerat ca o combinație de pârghii ce alcătuiesc dispozitivul pasiv osteo-articular al aparatului locomotor.

Tipul, amplitudinea și forța mișcărilor sunt guvernate, pe de o parte, de lungimea pârghiilor osoase și natura articulațiilor care leagă segmentele mobile, cât și de dispoziția, forma și numărul mușchilor care acționează asupra acestora, ca și de sarcinile care trebuie să fie mobilizate.

În acest caz, ca forță motrice care ar interveni în realizarea mișcărilor poate fi considerată și acțiunea pârghiilor osoase. Ținând cont de definiția lui Lapique, în care „mușchiul este un organ diferențiat ce produce prin contracția lui un lucru mecanic”, segmentele osoase asupra cărora acesta acționează se comportă din punct de vedere mecanic asemenea unor pârghii.

Un scurt rapel ne precizează trei puncte de aplicare a forțelor la nivelul pârghiei: două aparțin forțelor statice de sprijin (S) și rezistență (R); al treilea punct aparține forței motorii (F) (fig. 18.10).

La pârghia reprezentată de un oarecare segment osos, sprijinul (S) este reprezentat de axa biomecanică a mișcării sau de punctul de sprijin pe sol; rezistența (R) este dată de greutatea corpului sau a segmentului care se deplasează, la care se poate adăuga și greutatea sarcinii de mobilizat, iar forța (F) este reprezentată de inserția pe segmentul osos a mușchiului care realizează mișcarea. După raportul de aplicare a acestor trei puncte, pârghiile se clasifică în: pârghii de gradul I (cu sprijinul la mijloc), de gradul II (cu rezistența la mijloc) și de gradul III (cu forța la mijloc).

Funcția mecanică a pârghiilor și extrapolarea lor la nivelul angrenajului osteo-articular se deduce din formula de echilibru:

$$F \times l = R \times r,$$

în care F = forța, l = brațul forței, R = rezistența și r = brațul rezistenței.

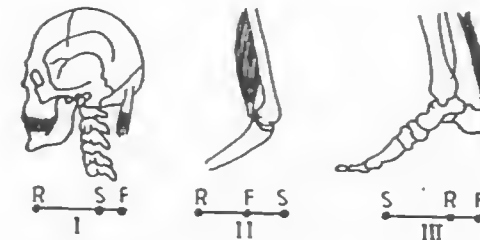


Fig. 18.10. Exemple de pârghii din corpul omenesc: de gradul I, II, III.

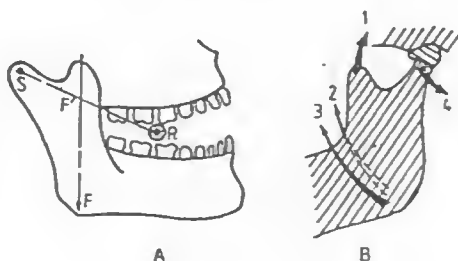


Fig. 18.11. Dispozitivul masticator temporo-mandibular. A: Mandibulă - pârghie de gradul III. B: Forțe active musculare. (1) temporal; (2) maseter; (3) pterigoidieni; (4) articulația temporo-mandibulară.

De aici, pârghiile de gradul I sunt cunoscute ca pârghii de echilibru, cele de gradul II ca pârghii de forță, iar cele de gradul III ca pârghii de viteză.

Raportul de distanță a punctelor de aplicare a celor trei forțe are o deosebită importanță în mecanica pârghiilor, de gradul III în special. În acest caz, pârghiile în care forța de aplicare este mai apropiată de punctul de sprijin sunt etichetate ca fiind și de viteză, iar cele în care aceasta este apropiată de punctul de rezistență sunt utilizate ca pârghii de forță, acționând însă cu viteze mult mai scăzute.

Mobilitatea dispozitivului articular. Mobilitatea articulară trebuie considerată ca un factor activ care participă la realizarea mișcărilor, imprimând chiar direcția acestora, astfel încât înăcă rolul unei forțe motrice. În acest caz, articulațiile nu au numai un simplu rol pasiv în executarea mișcărilor, forma lor și gradul de libertate de mișcare pe care îl oferă reprezentând factori importanți care dirijează direcția și sensul mișcărilor, putând limita, în același timp, și amplitudinea acestora.

Din punct de vedere al mobilității articulare, pe plan funcțional nu se pot distinge decât două categorii de articulații, unele care sunt concepute pentru mișcarea pieselor scheletice (articulațiile membrilor și mandibulei), denumite mobile, iar altele care au, dimpotrivă, rol în sudura acestora și fixitatea lor (articulațiile oaselor craniene), cunoscute sub numele de articulații imobile sau fixe (fig. 18.11).

Interacțiuni biomecanice externe. La realizarea funcției de locomoție, „forțelor somatice” descrise mai sus (comanda nervoasă motorie, contracția musculară, acțiunea pârghiilor osoase, mobilitatea articulară) li se adaugă o serie de factori ai mediului extern cu care aparatul locomotor interacționează în timpul activităților sale specifice.

Dintre aceștia, atrag atenția: greutatea corpului impusă de forța gravitațională care tinde să atragă corpul spre pământ, inerția care tinde să prelungească și să mențină o stare dată, presiunea atmosferică ca o componentă a forței gravitaționale, cu rol deosebit pentru menținerea în contact a suprafețelor articulare, rezistența mediului care tinde să se opună mișcării corpului, cât și forța de frecare care interacționează în contactul componentelor corporale cu solul, căreia i se alătură și forța de reacție a suprafeței de sprijin, egală și de sens opus forței gravitaționale.

Spațiul restrâns al expunerii nu permite tratarea mai pe larg a unor astfel de interacțiuni, ele fiind consemnate în diverse alte capitole și aparținând unor domenii de strictă specialitate.

18.4.3.2. Biocinetica locomoției

Analiza cinematică a mișcării pornește de la stabilirea reperelor de mișcare (planuri și axe), a tipurilor, direcțiilor și amplitudinii mișcărilor în raport cu aceste repere, precum și a diferitelor cupluri și lanțuri cinemate care participă la realizarea celor mai diverse activități locomotorii.

Repere biocinetice. Planurile anatomice sunt suprafețe care secționează imaginar corpul omensc sub o anumită incidență. În raport cu poziția anatomică, se disting trei planuri de referință, perpendiculare unele pe altele.

– **Planul sagital**, numit astfel pentru că este dispus pe direcția suturii sagitale a craniului, pe direcțiile verticală și antero-posterioară. Planul medio-sagital împarte corpul în două jumătăți, dreaptă și stângă.

– **Planul frontal** este denumit astfel deoarece urmează direcția suturii fronto-parietale sau coronare a craniului. Este dispus vertical și împarte corpul într-o parte anterioară și în parte posterioară.

– **Planul transversal** este dispus orizontal și împarte corpul în două părți: superioară și inferioară. Punctul de intersecție a celor trei planuri reprezintă centrul de greutate al corpului.

Axele biomecanice articulare. Articulațiile mobile (în special diartrozele) pot prezenta unul, două sau chiar trei grade de libertate, corespunzând pentru majoritatea mișcărilor mecanice de rotație cu una, două sau chiar trei axe de mișcare materializată.

Axa de mișcare reprezintă linia situată într-un anumit plan (sagital, frontal sau transversal), în jurul căreia unul din segmentele osoase se deplasează față de celălalt. Uneori, aceasta nu este neapărat fixă, putându-se deplasa odată cu segmentul, încât cunoașterea acestora devine indispensabilă pentru determinarea amplitudinilor articulare de mișcare. Există trei axe fundamentale perpendiculare una pe alta, care corespund planurilor de referință: axa sagitală, axa frontală și axa longitudinală.

– **Axa sagitală** este situată în plan sagital, fiind orientată și dirijată dinainte înapoi; această axă permite mișcări de abducție și adducție în plan frontal.

– **Axa frontală** este situată în plan frontal, în direcție orizontală și dirijată transversal; permite mișcări de flexie și extensie în plan sagital.

– **Axa longitudinală** este verticală și permite mișcări de rotație internă și externă în plan transversal.

Tipuri și direcții de mișcare. Mișcările se pot clasifica în raport cu planul în care este dispusă axa lor de mișcare și în funcție de participarea grupelor musculare (antagoniste fixatoare și neutralizatoare) la acțiunea „motorului” principal (aghiștii – de care depind forța, amplitudinea și poziția în care se execută mișcarea).

În funcție de planurile și axele de referință deosebim:

- 1) **flexia și extensia.** Sunt mișcări executate în plan sagital, în jurul axei frontale;
- 2) **abducția și adducția.** Sunt efectuate în jurul axei sagitale într-un plan frontal. În raport cu planul sagital al corpului, abducția depășește, iar adducția apropie de acest plan toate segmentele membrilor;
- 3) **înclinarea (inflexia) laterală.** Desemnează mișcări de lateralitate ale capului, gâtului și trunchiului, într-un plan frontal, în jurul axei sagitale. În mod obișnuit, la aceste mișcări se asociază și o rotație;
- 4) **rotația.** Se efectuează în jurul axului longitudinal și în plan transversal pentru toate părțile corpului, în afară de omoplat și claviculă. Poate fi externă și internă;
- 5) **bascula.** Termenul se utilizează pentru a defini anumite mișcări ale bazinului și omoplatului. În cazul omoplatului, bascula traduce o rotație în jurul axei sagitale, în timp ce pentru bazin aceasta poate fi în anteverție (anterior), retraversie (posterior) sau laterală (spre stânga sau dreapta);
- 6) **circumducția.** Este mișcarea care se execută simultan pe mai multe planuri, fiind o combinație succesivă de mișcări de flexie, extensie, abducție și adducție, care descriu o mișcare circulară particulară;
- 7) **glisarea și hiperextensia.** Sunt mișcări care depășesc limitele fiziologice. Glisarea se produce la nivelul suprafețelor articulare plane sau foarte ușor incurbate, în timp ce hiperextensia semnifică depășirea limitelor fiziologice ale rezistenței.

Ținând cont de gradul de participare a grupelor musculare antagoniste, fixatoare și neutralizatoare la acțiunea mușchilor agoniști, mișcările mai pot fi clasificate în: (1) mișcări de tensiune slabă (scrișul, mișcările de finețe și îndemănare); (2) mișcări de tensiune rapidă (mișcări de forță); (3) mișcări balistice (aruncări, lovituri etc.); (4) mișcări de oscilație (pendulări).

În ceea ce privește modul de declanșare și desfășurare sau blocare a unor mișcări cu participarea unor relee motorii conștiente sau inconștiente, acestea sunt împărțite în mișcări voluntare și involuntare (automate).

Particularitățile mișcărilor voluntare. Se încearcă adesea o distincție între mișcările „voluntare” și cele „automate” (mersul, săritura, fuga).

În acest sens, clasificarea existentă, în mișcări pur voluntare și mișcări involuntare (automate, inconștiente, reflexe), își pierde sensul, mișcările voluntare rămânând ca atare doar în scopul lor de realizare, cu participarea obligatorie a unor mecanisme complexe inconștiente, automate. În plus, realizarea

unei asemenea împărțiri devine și mai dificilă ținând cont de posibilitățile evoluției unei activități motorii voluntare dobândite prin exercițiu într-o activitate automată datorită transformării într-o deprindere.

Totuși, unele particularități pot fi atașate mișcărilor voluntare, pentru o mai bună conturare în raport cu celelalte:

- mișcarea voluntară cea mai simplă implică participarea unor multiple grupe musculare;
- întinderea și forța mișcărilor voluntare pot fi modificate atât prin variația frecvenței de descărcare a fiecărui motoneuron, cât și prin variația numărului de motoneuroni și, în consecință, a numărului de unități motorii puse în joc (confirmat prin traseu EMG de interferență);
- diversele componente ale mișcărilor voluntare trebuie să se succedă într-o ordine convenabilă, iar mișcarea în întregime să fie adaptată la stimulii care o nasc;
- mișcarea voluntară se greșează întotdeauna pe un fond de activitate posturală.

O serie de aspecte privind mecanismele de producere și dirijare a acestora spre un anumit scop sunt amintite în cadrul funcțiilor motorii ale SNC.

Activități motorii involuntare (automate). În cazul în care evoluția unor activități motorii voluntare ajunge la o deprindere, însoțită prin exercițiu, aceasta poate căpăta un caracter automat stereotipic. Printre cele mai importante se situează mersul, alergarea, săritura și o serie de activități efectuate cu membrele superioare, cum ar fi scrisul sau cântatul la un instrument.

Pentru exemplificarea unor aspecte privind particularitățile de producere a mișcărilor automate, ne oprim asupra mersului.

Ca activitate motrice automată în care intervin mecanisme atât de reglare a mișcării, cât și de echilibrare statokinetică, mersul reprezintă deprinderea motrică prin care se realizează în mod obișnuit locomotia corpului în coordonatele spațiale. Mecanismul principal pe care se bazează mersul este mișcarea alternativă și constantă a celor două membre inferioare care-și asumă pe rând funcția de suport și propulsor.

Evoluția filogenetică a dus la dezvoltarea unei astfel de forme arhitecturale a corpului omenesc, încât acesta să poată acționa cu o remarcabilă conservare de energie și, în același timp, să respecte cele două mari cerințe ale mersului: stabilitate și mobilitate. *Stabilitatea* este esențială, deoarece balansarea și echilibrul trebuie susținute în timpul accelerării, decelerării și oscilațiilor care se produc la fiecare pas. *Mobilitatea* care rezultă din coordonarea activității musculare, a gravitației și a inerției sistemelor de pârghii este indispensabilă dirijării diferitelor segmente ale corpului pe traiectoria progresiei.

Fazele mersului. Primul impuls în pornirea mersului este declanșat în apropierea centrului de greutate, când trunchiul se apleacă înainte pentru ca proiecția centrului de greutate să treacă înaintea bazei de susținere; aproape concomitent, membrul inferior de sprijin se extinde și corpul este proiectat înainte și puțin în sus; simultan cu aceasta, celălalt membru inferior, care devine pendulant, părăsește solul și este proiectat înaintea membrului de sprijin și fixat din nou pe sol. Fazele se repetă apoi cu membrele în poziție inversă.

Mersul se compune astfel dintr-o serie de perioade de sprijin unilateral, separate între ele prin perioade de sprijin dublu.

„Pasul” mersului ar corespunde seriei de mișcări care se succedă între cele două poziții identice ale unui singur picior. Prin înregistrări cinematografice de mare viteză (100 de imagini/s) s-au putut preciza patru momente principale: (1) debutul dublului sprijin; (2) dublul sprijin; (3) sprijinul unilateral cu — (a) semipasul posterior, (b) momentul verticalei, (c) semipasul anterior; (4) debutul dublului sprijin ulterior.

Kinemograma mersului. Datele prezentate mai sus au fost corelate cu diverse înregistrări, din care kinemograma pare cea mai interesantă (fig. 18.12).

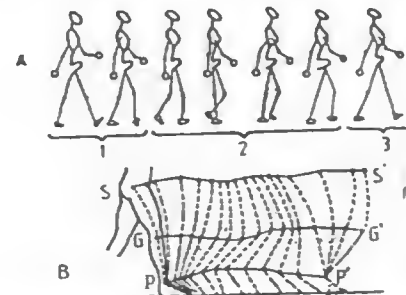
Traectoria șoldului prezintă două oscilații verticale, una în faza de sprijin și una în faza de pendulare.

Traectoria genunchiului sugerează fidel mișcările de dublu sprijin și de sprijin unilateral prin oscilațiile de urcare și coborâre a traiectoriei.

Traectoria articulației gleznei este puțin mai complicată, dar ea urmărește fidel fazele contactului și dezlipirii plantei de sol.

În patologia deficiențelor musculare, mecanismele de deplasare se modifică atât segmentar, cât și în totalitate, determinând o reacție de adaptare a locomotorului pentru utilizarea unor forțe musculare restante și punerea în joc a mecanismelor de stabilizare pasivă. Aceasta este posibilă dat fiind că mersul pretinde

Fig. 18.12. A: Fazele mersului. (1) sprijin bilateral; (2) sprijin unilateral; (3) sprijin bilateral. B: Kinemograma mersului normal. SS', traiectoria axei transversale a șoldului. GG', traiectoria axei transversale a genunchiului. PP', traiectoria axei transversale a gleznei (Bactu).



o utilizare minimă de forță în care un mare rol, după începerea mișcării, îl au forțele exterioare și în special inerția.

În cazul alergării sau al fugii, care ajută la deplasarea mai rapidă a corpului, înaintarea se face prin trecerea succesivă a unui membru inferior înaintea celuilalt, sprijinul efectuându-se însă numai pe câte un picior. Între două momente de sprijin au loc mici sărituri prin aruncarea corpului înainte și suspendarea sa pentru scurt timp în aer.

Centrii de greutate în aterizare nu se deplasează rectiliniu, descriind un traiect sinusoidal în plan vertical și orizontal. Spre deosebire de mers, în fugă corpul se detașează de pământ înainte ca piciorul anterior să-l fi atins.

În săritură, omul realizează chiar o desprindere momentană de sol, în unele cazuri suficient de mare, așa cum are loc în volei, baschet, săritura în lungime sau în înălțime etc. În toate aceste desprinderi, participă aproape întreaga musculatură a aparatului locomotor pentru realizarea echilibrului și mișcării, dar într-o proporție diferită calitativ și cantitativ, funcție de anumite faze particulare unei activități motrice.

În cadrul altor deprinderi motrice, se pot aminti mișcările complexe ale membrilor inferioare și superioare, cu implicații în diverse activități semiautomate sau automate, ca baletul, patinajul, scrisul, cântatul la diverse instrumente, sculptura etc.

În același context amintim mișcările mandibulare legate de îndeplinirea actului masticator sau al celui fonator, cu participarea mușchilor din teritoriile laringian și faringian, alături de mișcările globilor oculari, cu implicații în funcțiile vizuale, de echilibru, orientare și de relație a organismului în complexitatea elementelor din mediul exterior.

19. FIZIOLOGIA SISTEMULUI NERVOS

19.1. ORGANIZAREA FUNCȚIONALĂ A SISTEMULUI NERVOS

Sistemul nervos este reprezentat de ansamblul căilor de conducere și al centrilor nervoși care recepționează, conduc, stochează, prelucreează și integrează informații senzitivo-senzoriale de diverse tipuri, în vederea elaborării reacțiilor reflexe și voluntare de apărare și adaptare a organismului la condițiile variabile impuse de mediul extern sau intern.

Căile de conducere și centrii nervoși care asigură sensibilitatea senzitivo-senzorială și activitatea somatică motorie, indispensabile relațiilor organismului cu mediul înconjurător, aparțin sistemului nervos somatic sau de relație.

Căile și centrii nervoși care reglează funcțiile vitale vegetative (circulație, digestie, respirație, excreție etc.) formează sistemul nervos vegetativ.

Ambele componente ale sistemului nervos prezintă un segment central (intranevraxial) și altul periferic (extranevraxial). Căile aferente extranevraxiale sunt în majoritatea cazurilor comune sistemului nervos somatic și celui vegetativ. Ele sunt formate din prelungirile dendritice și axonale ale neuronilor senzitivi și senzoriali cu sediul în ganglionii spinali și, respectiv, cranieni. Excepție fac doar fibrele senzitive plecate de la nivelul zonelor reflexogene viscerele. La rândul lor, căile eferente posedă centri și fibre nervoase proprii fiecăreia din cele două componente ale sistemului nervos (fig.19.1).

Centrii sistemului nervos somatic sunt situate numai intranevraxial, în strânsă interdependență cu centrii organo-vegetativi cerebro-spinali. Spre deosebire de centrii coordonatori ai vieții de relație, centrii organo-vegetativi au sediul atât intranevraxial, cât și extranevraxial, la nivelul ganglionilor paravertebrali, prevertebrali și previscerali.

Pe plan funcțional, sistemul nervos somatic asigură relațiile dintre organism și mediul înconjurător, în timp ce sistemul nervos al vieții vegetative reglează și adaptează la necesități activitatea organelor și țesuturilor care aparțin aceluiași organism. Cele două sisteme sunt interconectate la diferite niveluri ale axului cerebro-spinal, realizând împreună cu sistemul endocrin reacțiile neuro-endocrino-metabolice generale și locale de răspuns la diversele solicitări, urmate de restabilirea și menținerea echilibrului homeostazic, caracteristice stării de sănătate.

Subordonate sistemului nervos, glandele endocrine reprezintă cea de a treia cale eferentă cu rol predominant în reglarea funcțiilor metabolice ale organismului.

Spre deosebire de reacțiile somato-vegetative compensatoare, care sunt rapide, intervenția glandelor endocrine este de regulă lentă, prelungind în timp efectele componentei nervoase inițiale. Ca urmare a informațiilor sosite la centrii coordonatori, pe căile aferente senzitivo-senzoriale din mediul ambiant și propriul organism, sistemul nervos elaborează, dirijează și armonizează reacțiile motorii și secretorii eferente, indispensabile apărării, adaptării și homeostaziei. Funcționând după principiul conexiunii inverse și retroacțiunii, căile aferente și eferente se influențează reciproc prin procese de autoreglare și control de tip *feed-back* negativ și pozitiv, cu participarea obligatorie a centrilor coordonatori, în vederea corectării reacțiilor neuro-endocrine și adaptării permanente a acestora la necesitățile variabile ale organismului.

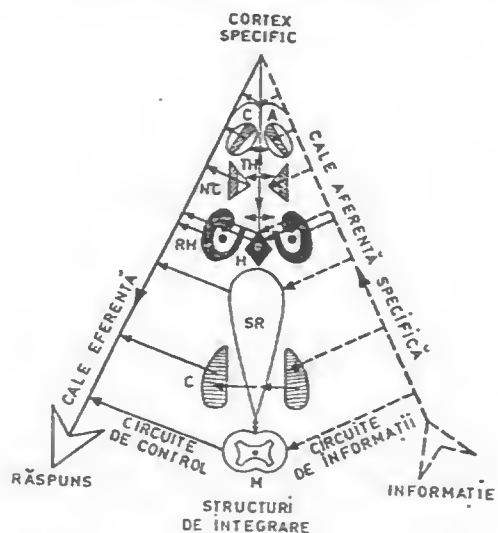


Fig. 19.1. Schema cibernetică de organizare structural-funcțional a axului cerebro-spinal. CA, cortex asociativ. TH, talamus. NC, nuclei cenșii. RH, riencefal. H, hipotalamus, SR, substanță reticulată. C, cerebel. M, măduva spinării.

Complexitatea activităților de control pe care le realizează sistemul nervos este unică. El primește mii de informații de la nivelul organelor senzoriale, pe care le integrează pentru a elabora un răspuns corespunzător, în scopul de a realiza o confirmare cât mai adecvată a organismului la mediul înconjurător.

De altfel, integrarea organismului în mediul său de viață se realizează datorită:

- posibilității de traducere a variațiilor energetice înconjurătoare în senzații specifice, prin intermediul „sistemelor aferente” sau al „sistemelor senzitivo-senzoriale”;
- capacitatea de a elabora și realiza reacții de răspuns adecvat solicitărilor din mediul înconjurător, prin „sisteme eferente” sau „sisteme motorii”;

- activități de integrare adecvată a organismului în mediul său de viață, printr-o tratare corespunzătoare a informațiilor. Rezultatul acestor procese asigură comportamentul adecvat, iar la om și funcțiile intelectuale.

Astfel, sistemul nervos realizează preluarea, transmiterea și integrarea informațiilor senzitivo-senzoriale și elaborarea reacțiilor adaptative reflexe și voluntare (comportamentale, ideative și psiho-emoționale).

19.1.1. SISTEMELE SENZITIVO-SENZORIALE

Cea mai mare parte a activității sistemului nervos este rezultatul experienței senzoriale care provine de la receptorii senzitivo-senzoriali tactili, termici, dureroși, vizuali, auditivi, gustativi, olfactivi, proprioceptivi, statokinetici etc.

Impactul dintre variațiile energetice din mediul extern și senzorii organismului poate să genereze reacții imediate sau memoria lor poate fi stocată la nivelul creierului timp de minute, săptămâni sau ani, contribuind astfel la realizarea unor reacții ulterioare.

De la nivelul receptorilor, informația abordează sistemul nervos central, antrenând în activitate măduva spinării, trunchiul cerebral, cerebelul, talamusul și ariile senzitivo-senzoriale corticale (fig. 19.2).

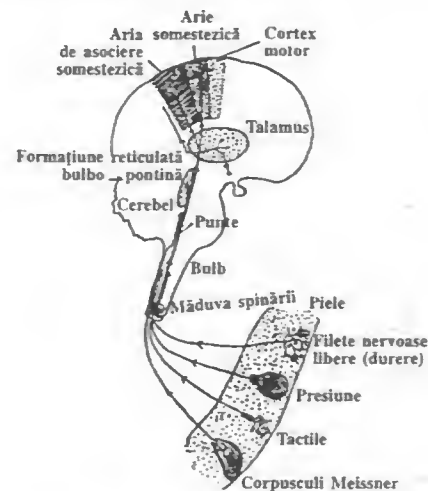


Fig. 19.2. Reprezentare schematică a sistemului aferent senzitiv.

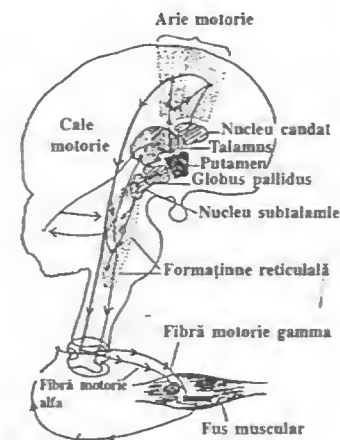


Fig. 19.3. Reprezentarea schematică a sistemului motor.

Din informațiile senzitivo-senzoriale ajunse la scoarța cerebrală, numai o mică parte servește la inițierea răspunsului reflex sau voluntar imediat. Majoritatea lor este stocată și prelucrată în vederea realizării unor activități motorii sau ideative ulterioare.

19.1.2. SISTEMELE MOTORII SAU EFECTOARE

Sistemul nervos central are ca principal rol controlul diverselor activități ale organismului (contractia mușchilor scheletici, a mușchilor netezi din structura organelor interne, secreția glandelor exo- și endocrine). Aceste activități poartă numele generic de funcții motorii ale sistemului nervos, iar mușchii și glandele respective sunt denumite efectori, întrucât efectuează activități dictate de semnalele nervoase (fig. 19.3).

Componentele sistemului nervos care asigură controlul contractiei musculaturii scheletice alcătuiesc „sistemul motor somatic”.

Un sistem asemănător care controlează activitatea mușchilor netezi și a glandelor exo- și endocrine ce operează în paralel cu sistemul motor somatic reprezintă „sistemul motor vegetativ”.

Sistemul nervos central participă la realizarea motricității organismului, prin intermediul unor structuri care cuprind arii corticale, nucleii bazali, cerebelul, trunchiul cerebral și măduva spinării. Fiecare etaj are particularități funcționale specifice de intervenție în controlul motricității organismului. Astfel, în timp ce regiunile inferioare (măduva, trunchiul cerebral) realizează în special răspunsuri reflexe instantanee, automate, la stimulii senzitivo-senzoriali, regiunile superioare participă la elaborarea unor mișcări deliberate, controlate prin procesele de gândire de la nivelul emisferelor cerebrale.

Activitatea sistemului nervos poate fi asimilată funcționării ordinarilor, ale căror circuite de intrare sunt comparabile cu sistemele senzoriale, iar circuitele de ieșire cu sistemele motorii. Între circuitele de intrare și ieșire se găsesc mecanisme care efectuează diferite tipuri de calcule, într-o succesiune determinată de unitatea de programare.

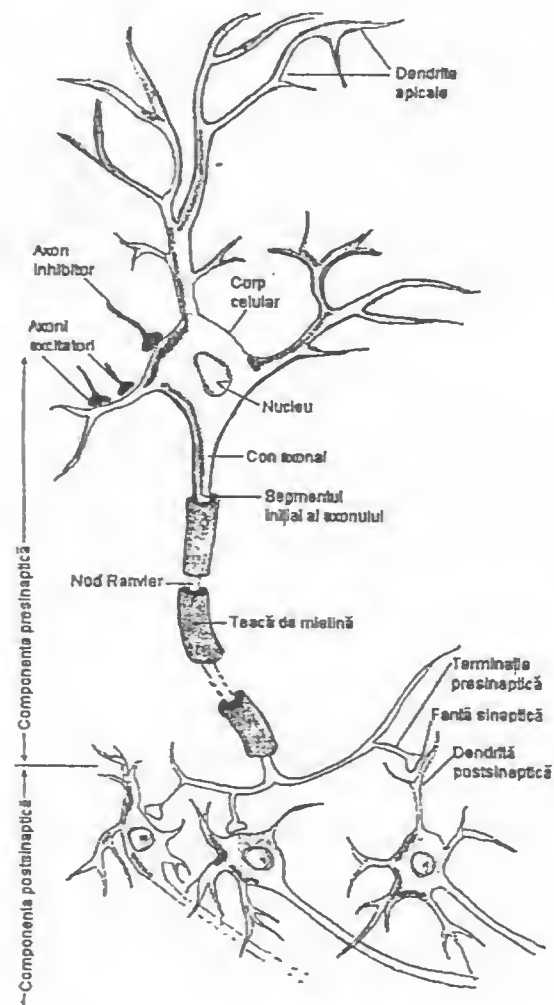


Fig. 19.4. Reprezentarea schematică a unui neuron.

Creierul uman se comportă ca un ordinator ce primește informații senzitivo-senzoriale pe care le utilizează, împreună cu informațiile stocate, în vederea elaborării diverselor forme de activitate a organismului. Cum atât stocarea și prelucrarea informațiilor, cât și elaborarea răspunsurilor reflexe sau voluntare au loc la nivelul sinapselor interneuronale, într-un prim moment vor fi succint prezentate principalele date de histo-fiziologie neuronală.

19.2. ELEMENTE DE HISTO-FIZIOLOGIE NEURONALĂ

Ca unitate morfo-funcțională și genetică elementară a sistemului nervos, neuronul prezintă o citoarhitectonică adaptată acestei funcții. Neuronii sunt celule prevăzute cu un corp (somă, pericarion) și o aureolă de prelungiri (axon, dendrite) (fig. 19.4).

19.2.1. NEURONUL

În corpul celei neuronale se regăsește majoritatea structurilor celulare.

Membrana neuronală, învelișul periferic al neuronului, reprezintă o diferențiere citoplasmatică destinată în același timp delimitării, dar și comunicării cu mediul pericelular. Organizarea sa moleculară se acceptă a fi cea în „mozaic lichid” (Singer și Nicolson).

Nucleul și alte organele celulare (reticul endoplasmatic, ribozomi, aparat Golgi, condriom, lizozomi) sunt bine reprezentate la nivelul pericarionului, fără a prezenta particularități evidente. Apar în schimb anumite diferențieri specifice, cum ar fi corpusculii Nissl și neurofibrilele (fig. 19.5).

Corpusculii Nissl (substanța tigroidă) reprezintă o diferențiere specific neuronală a reticulului endoplasmatic. Sunt formați din rânduri paralele de tubuli, având numeroși ribozomi atașați. Îndeplinesc funcții importante în procesele metabolice și în special în sinteza proteică.

Neurofibrilele sunt agregate proteice filamentoase mai mult sau mai puțin complexe. Asemenea structuri au fost observate și în alte tipuri de celule (nevroglii). Neurofibrilele reprezintă de fapt artefacte constituite prin agregarea unor ultrastructuri, sub acțiunea fixatorilor și coloranților utilizați în microscopia optică. Aceste structuri, evidențiate la microscopul electronic, sunt neurofilamentele și neurotubulii. Neurofilamentele distribuite abundent în toate segmentele neuronului sunt agregate de subunități proteice globulare dispuse longitudinal. Au un diametru de 80-100 Å. Neurotubulii (microtubulii) sunt structuri tubulare, cu un diametru mult mai mare (240 Å), formate dintr-un perete dens și o zonă centrală mai clară.

Semnificația funcțională a acestor structuri nu este deocamdată bine precizată. Li se atribuie un rol de suport (schelet) fibrilar intraneural. Neurotubulii, ce par a fi o diferențiere a reticulului endoplasmatic,

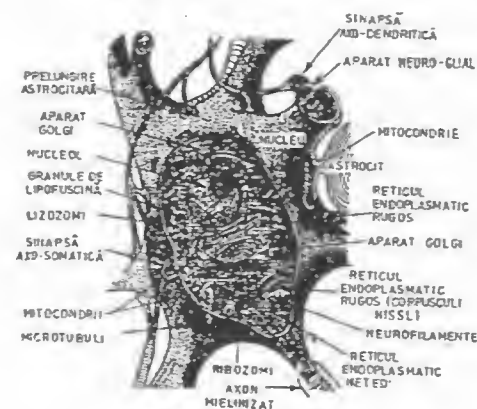


Fig. 19.5. Structura pericarionului neuronal (reprezentare schematică).

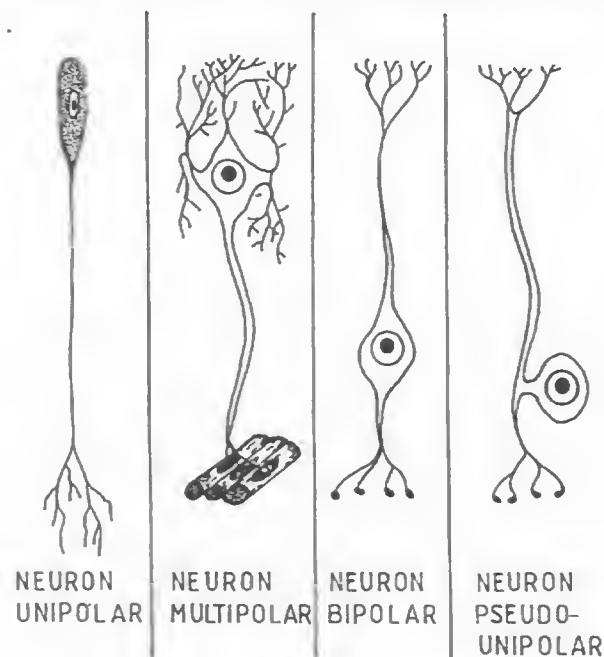


Fig. 19.6. Reprezentarea schematică a unor neuroni.

ar avea rol în activitățile sintetice și de transport neuroendocrine. Tubulina, proteina de constituție a acestor structuri, pare a fi implicată în transportul axonal de substanțe cu rol trofic.

Particularități secretorii. Există neuroni cu structuri și funcții asemănătoare cu cele ale celulelor glandulare. Acești neuroni, descriși în sistemul hipotalamo-hipofizar, prezintă toate caracteristicile structurale și funcționale ale oricărui neuroendocrin (granulații Nissl, neurofibrile, sinapse la nivelul somii și dendritelor, geoeza potențialelor de acțiune, excitabilitate electrică etc.). Alături de aceste particularități tipic neuronale, celulele din categoria citată prezintă și anumite trăsături distinctive: axonii se termină în apropierea unui vas de sânge; în pericariu, aparatul Golgi produce granule de secreție care se conglomerază, formând picături și vezicule ce migrează în lungul axonului, la a cărui extremitate își varsă conținutul hormonal spre teritoriul vascular. La aceste aspecte particulare se adaugă și constatarea mai generală a faptului că majoritatea covârșitoare a neuronilor transmit influxul nervos prin intermediul unor substanțe mediatore (noradrenalină, acetilcolina, dopamina etc.). Procesul de producere, sinteză și eliberare a acestor substanțe este, cu excepția destinației finale, extrem de asemănător cu cel observat în neuroendocrinii cu așa-zisă activitate glandulară. Prin urmare, se poate considera neuroendocrinul ca fiind, în general, o celulă cu capacități de neurosecreție; celulele complexului hipotalamo-hipofizar reprezintă doar un caz particular de diferențiere majoră în seos endocrin.

Prelungirile neuronului. Dendritele. În forma cea mai tipică sunt prelungiri scurte sau mai groase la bază și ramificate abia deot. Conțin mitocondrii, reticul endoplasmatic, granulații Nissl, neurotubuli. Din punct de vedere funcțional, sunt prelungiri celulete.

Axonul (fibră nervoasă). Element conductor al influxului nervos prin excelență, axonul este componenta cea mai caracteristică a neuronului. După structura învelișului, fibrele nervoase se pot clasifica în două mari categorii: mielinizate și amielinice.

Fibrele nervoase mielinizate sunt formate din ciliodrax, axolemă, teacă de mielină, teacă Schwann (neurilemă).

Ciliodraxul este format din citoplasmă (axoplasmă), conținând neurofilamente, neurotubuli și alte organite, inclusiv mitocondrii; lipsesc corpusculii Nissl.

Axolema reprezintă o continuare a membranei neuronale de la nivelul pericariului.

Teaca de mielină este un înveliș de natură lipoproteică, întrerupt din loc în loc de strânguțiile (nodurile) Ranvier. Spațiul dintre două noduri Ranvier (internodul) este constant pentru aceeași fibră. Teaca de mielină se formează datorită rulării în spirală a celulelor Schwann, din care dispare citoplasma. Nodul este zona de contiguitate între celulele Schwann învecinate. La acest nivel axolema este deodată.

Fibrele nervoase amielinice (fibre Remak) sunt lipsite de mielină, au un diametru în general redus și sunt acoperite de o teacă Schwann, care este frecvent comuă pentru câțiva axoni (10-15).

Tipuri de neuroni. Cea mai utilizată clasificare a neuronilor, în afara celei funcționale (neuroni motori, senzitivi, interneuroni), este clasificarea bazată pe numărul și dispunerea prelungirilor. Ținând cont de criteriu, se disting neuroni bipolari, unipolari și multipolari (fig. 19.6).

19.2.2. NEUROGLIA

Neuronii nu alcătuiesc decât o parte din masa totală a țesutului nervos, reprezentată în majoritate de un ansamblu de celule de susținere, fibre și substanță intercelulară, cunoscut sub genericul de neuroglie sau glie. S-au descris până în prezent numeroase tipuri de celule gliale. Mai semnificative din punct de vedere al funcționalității neuroendocrine par a fi: macroglia (astroglia, neuroglia astricitară), oligodendroglia, microglia (mesoglia), neuroglia ependimară și neuroglia periferică (celule Schwann și alte tipuri) (fig. 19.7).

Aceste celule formează membrane perivasculară și perineuronale (bariera hemato-encefalică), furnizează teaca de mielină, formează lama ce limitează sistemul cavității bematice-encefalică, joacă rol fagocitar, nutritiv și de cicatrizare.

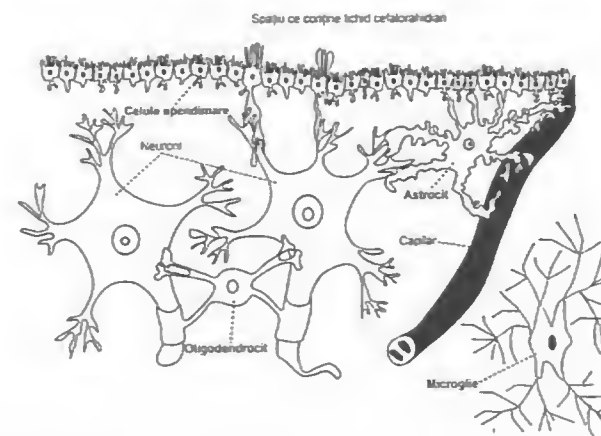


Fig. 19.7. Principalele tipuri de celule gliale.

În timp ce astrocitele asigură delimitarea terminațiilor sinaptice adiacente, limitând difuziunea liberă a substanței mediatore, celulele neurogliale de la nivelul sistemului nervos periferic (celulele Schwann) contribuie la formarea de mielină indispensabilă conducerii saltatorii prin fibrele nervoase mielinice.

La rândul lor, oligodendrogliele înfășoară axonii mielinici din sistemul nervos central, în timp ce ovoidurile sunt implicate în apărarea fagocitară a creierului.

Funcții delimitante de suport și de izolare similare astrocitelor realizează și celulele gliale satelite prin încapsularea căilor nervoase dorsale și a ganglionilor cranieni.

În cazul celulelor neurogliale ependimale, acestea separă țesutul nervos cerebral de lichidul cefalorahidian secretat în mare parte de celulele respective ale plexurilor coroide.

19.2.3. FORMAREA, DIFERENȚIEREA ȘI CREȘTEREA NEURONILOR

Neuronii derivă din celulele germinale ale plăcii neurale ectodermice, care se transformă în neuroblaști apolari (lipsiți de prelungiri). Prin migrări succesive, își ocupă poziția definitivă. În acest interval, apar întâi axonul și apoi arborizația dendritică (neuroblaști polari). Maturizându-se, neuroblaștii își dezvoltă toate caracteristicile neuronului adult. Creșterea axonului este strâns legată de un transport axonal celulefug de substanțe sintetizate la nivelul pericarionului. Proteinele, o parte dintre mediatori, mitocondriile și alte substanțe sunt antrenate de acest flux axonal spre terminația axonală, a cărei creștere o asigură.

Separarea unei părți din axon de pericarion, prin compresiune sau ligatură, determină apariția unor fenomene de degenerescență anterogradă a extremității izolate (degenerescență walleriană), dar și a porțiunii proximale (degenerescență retrogradă), urmate de fenomene de regenerare. Degenerescența anterogradă de tip wallerian demonstrează rolul trofic exercitat de pericarion prin fluxul axonal asupra prelungirilor nervoase. Degenerescența retrogradă însoțită de crnmatoliză (distrugerea grănuțelor Nissl) apare sub influența solicitării intense a funcției de proteosinteză neuronală, în cursul fenomenelor de reparație tisulară. Regenerarea terminației secționate începe la scurt timp după secțiune. Din bontul proximal apar numeroase prelungiri foarte fine, ce se alungesc rapid și pătrund în interiorul tecii Schwann rămase după degenerescența walleriană și pe care o ocupă în întregime. Din aceste filamente, doar unul singur reface complet vechiul traiect nervos și contactele sinaptice. În acest moment, restul fibrelor de neoformare dispără, iar axonul rămas se îngroașă și își reface teaca de mielină.

Dacă fibrele nu pătrund pe vechiul traiect nervos, ele se dezvoltă haotic, formând ghemuri ce reprezintă adesea sursa unor dureri cicatriceale violente. Menținerea tecii extremității degenerate în poziție cu bontul proximal reprezintă o condiție esențială a refacerii traiectului nervos. La nivelul sistemului nervos central, fibrele distruse ou pot restabili vechile conexiuni, fapt important în rezultatele obținute prin intervențiile neuro-chirurgicale. În această direcție s-au depus eforturi considerabile, ce au dus la izolarea unor factori umorali cu rol în activarea creșterii și multiplicării elementelor nervoase, cum ar fi, de exemplu, „factorul de creștere nervoasă” (NGF), descris de Rita Levi Montalcini, onorată cu premiul Nobel (1986).

Geneza și conducerea influxului nervos fiind discutate anterior, odată cu proprietățile fundamentale ale celulelor, în continuare vor fi trecute în revistă particularitățile histo-fiziologice ale sinapselor inter-neuroale și neuro-efectoare sau neurotrofinele 3, 4 și 5 cerebrale.

Factorul de creștere nervoasă. Factorul de creștere nervoasă (NGF) este o proteină neurotrofă cu masă moleculară de 26 500 daltoni, amplu studiată în ultimele decenii. S-a precizat, printre altele, că aceasta activează diferențierea și creșterea celulelor nervoase de la nivelul ganglionilor simpatici și a fibrelor senzitive periferice.

Identificat inițial în fracția microsomală a tumorilor 180 și 37 de șoarece, NGF a fost ulterior găsit în glandele submaxilare de șoarece mascul, în veninul de șarpe, hipocampusul, mezencefalul, scoarța și celulele gliale ale mamiferelor.

Având structură proteică, s-a încercat prepararea de anticorpi specifici anti-NGF în vederea utilizării lor la realizarea neuroizei simpatici prin imunosimpatectomie. Rezultatele fiind modeste, cercetările au continuat asupra efectelor neurotrofice și implicațiilor fiziolo-farmacologice ale NGF.

S-au efectuat cercetări asupra regenerării neuronale centrale și periferice, constatându-se că NGF activează ciclul celular al ganglionilor spinali și vegetativi simpatici după internalizarea complexului format cu receptorul specific membranar în vederea transportului retrograd la corpul celular, cu participarea unor mesageri secundari de tipul AMP ciclic și al ionilor de calciu.

Prin mecanisme metabolotrope și ionotrope similare celor periferice, NGF participă la supraviețuirea și creșterea neuronilor colinergici în unele boli neurodegenerative centrale (exemplu, boala Alzheimer) și periferice (neuropatia diabetică).

Similarități structurale, metabolice și funcționale cu NGF prezintă *neurotrofinele* și mai ales neurotrofina-3 (NT-3). Împreună cu factorul neurotrofic ciliar (FCF), neurotrofina-3 (NT-3) acționează în sens stimulant asupra motoneuronilor periferici, contribuind la înmugurirea regeoerativă a acestora.

La nivel cerebro-spinal, cele trei neurotrofine (NT-3, FGF și CNTF) contribuie atât la dezvoltarea spinelor dendritice, cât și la asigurarea plasticității structurale a rețelelor neuronale de la nivelul sinapselor axo-dendritice implicate în procesele chimice de neuroprotecție, memorizare și învățare.

19.3. SISTEME AFERENTE SENZITIVO-SENZORIALE

Accesul informațiilor din mediul ambiant către sistemul nervos central este asigurat de către receptori, care detectează stimuli senzoriali, cum ar fi contactul, sunetul, lumina, variațiile termice etc. Informațiile selectate prin activitatea receptorilor sunt prelucrate la nivelul tuturor etapelor de conducere, începând cu organul receptor și terminând la nivelul ariei corticale specifice (vezi fig. 19.2). Astfel, receptorii recunosc, selecționează și traduc variația energetică exterioară în influx nervos, care va fi condus în etape succesive, la nivelul cărora se realizează procese de codificare temporo-spațială, până în aria corticală specifică. La nivelul cortexului specific, mesajul este decodificat, realizându-se imaginea primară, senzația respectivă.

Receptorii pot fi, deci, considerați adevărați traducători, care efectuează conversia unor forme particulare de variație energetică din mediul înconjurător sau din interiorul organismului într-o altă formă de energie, „influx nervos”, care poate fi transmisă și utilizată de sistemul nervos central.

19.3.1. CLASIFICAREA RECEPTORILOR

Există numeroase clasificări ale receptorilor senzitivo-senzoriali; una dintre acestea are la bază capacitatea lor de a produce sau nu, în sistemul de prelucrare a informației, o senzație caracteristică. În acest sens, formațiunile care nu generează o senzație caracteristică sunt considerate ca elemente ce intervin în procesele de reglare funcțională, informând SNC asupra activității interne a organismului. În consecință, SNC decide modificări sau corecții în activitatea organelor interne sau periferice implicate în funcțiile respective. În cadrul sistemului nervos vegetativ, receptorii pot detecta, spre exemplu, valurile presiunii arteriale, pe care SNC le poate interpreta în vederea realizării, dacă este necesar, a modificărilor adecvate menținerii organismului la un status funcțional de confort. În cadrul sistemului motor, receptorii furnizează informații în legătură cu forța, direcția și viteza de contracție musculară, așa încât SNC va fi capabil să aprecieze dacă efortul întreprins este adecvat necesităților motorii din momentul respectiv.

În funcție de localizare și natura excitantului, receptorii pot fi clasificați în exteroceptori, proprioceptori și interoceptori (tabelul 19.1).

Exteroceptorii includ o varietate largă de structuri specializate: mecanoreceptorii, care sesizează contactul, poziția unui segment al organismului, durerea, sunetul; receptorii vizuali, care informează asupra cantității de lumină din mediul înconjurător și a culorilor; chemoreceptorii, termoreceptorii etc.

Proprioceptorii sunt implicați în reglarea funcțiilor motorii. Acești receptori fac parte exclusiv din clasa mecanoreceptorilor care semnalizează viteza, tensiunea și gradul de scortare a mușchiului.

Interoceptorii sau **visceroceptorii** fac parte exclusiv din cadrul sistemului nervos vegetativ și sunt apti atât pentru inițierea unor procese geogatoare de senzații specifice, cât și pentru reglarea funcțiilor vegetative ale organismului.

În structura majorității exteroceptorilor intră fibre nervoase mielinice de tip A și fibre amielinice C aparținând nervilor cutanați. Fibrele A-alfa mediază stimuli tactili pentru atingere și presiune, iar fibrele A-delta stimuli pentru atingere, rece, durere tolerabilă, bine localizată și, probabil, de gădilar. Fibrele C conduc impulsuri de la receptorii pentru cald și rece, durere difuză, mâncărime și gădilar (fig. 19.8).

TABELUL 19.1

Clasificarea receptorilor după natura excitantului

Mecanoreceptorii:

- Sensibilitatea tactilă cutanată (epiderm și derm):
 - terminații nervoase libere;
 - terminații butonate: corpusculi Ruffini, discuri Merkel, diverse alte variante;
 - terminații încapsulate: corpusculi Meissner, corpusculi Krause, corpusculi Pacini;
 - receptori anexați firelor de păr.
- Sensibilitatea țesuturilor profunde:
 - terminații nervoase libere;
 - terminații butonale: corpusculi Ruffini;
 - terminații încapsulate: corpusculi Pacini;
 - terminații specializate: fusuri neuro-musculare, receptori Golgi.
- Auzul: celulele receptoare auditive (organul Corti).
- Echilibrul: receptori vestibulari.
- Presiunea arterială: baroreceptorii din sinusul carotidian și crosa aortei.

Termoreceptorii:

- Frig: probabil terminații nervoase libere.
- Cald: probabil terminații nervoase libere.

Nociceptorii: terminații nervoase libere.

Receptorii electromagnetici:

- Vedere: celule cu conuri, celule cu bastonașe.

Chemoreceptorii:

- Gust: muguri gustativi din papilele gustative.
- Miro: neuroni bipolari din mucoasa olfactivă.
- Oxigen: receptori din corpusculii carotidieni și aortici.
- Bioxid de carbon sanguin: receptori din măduva osoasă și din corpusculii carotidieni și aortici.
- Osmolaritate: neuroni din nucleul supraoptic.
- Glucoză, aminoacizi, acizi grași plasmatici: receptori în hipotalamus.

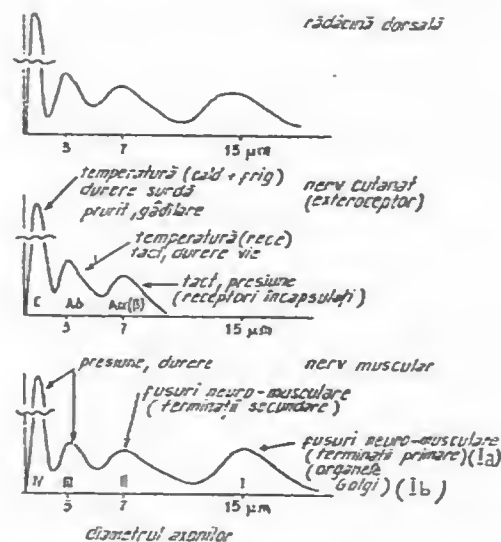


Fig. 19.8. Distribuția fibrelor aferente în funcție de mărimea diametrului, viteza de conducere și tipul de informații condate.

Proprioceptorii dețin în constituția lor filete nervoase care împrumută calea nervilor musculari și osteo-articulari. Fibrele senzitive din nervii musculari sunt împărțite în mai multe grupe: I, II, III și IV. Cele mai multe fibre senzitive din nervii musculari fac parte din grupele I și II și conduc impulsuri în legătură cu lungimea și tensiunea musculară și viteza de contracție. Grupul I cuprinde două subgrupe: Ia, care realizează spirala din porțiunea mijlocie a fusurilor neuro-musculare, și Ib, din structura organelor tendinoase Golgi. Fibrele din categoria a doua sunt cunoscute sub numele de fibre „în buchet”, ce intră în constituția fusurilor neuro-musculare, iar cele din grupele III și IV provin de la fasciile musculare și de la alte țesuturi profunde. Impulsurile kinestezice care inediază informații în legătură cu recunoașterea organismului și a poziției diverselor sale segmente sunt conduse de nervii articulari.

Neuronul senzitiv și formațiunile receptoare aferente deservește o arie senzitivă variabilă în funcție de extinderea ramurilor dendritice. S-a născut, astfel, noțiunea de câmp receptor, ce este definit prin aria periferică la nivelul căreia un stimul specific, acționând, poate să genereze potențiale de acțiune în fibrele neuronului senzitiv tributar. Câmpul receptor poate fi măsurat relativ simplu la nivelul tegumentului și reprezintă aria cutanată care, stimulată mecanic, determină excitarea fibrei nervoase senzitive corespunzătoare. Noțiunea de câmp receptor are însă aplicații particulare. Se poate construi unghiul necesar care determină excitarea unei unități sensibile la modificarea poziției la nivelul unei articulații sau câmpul vizual care exprimă în minute unghiul deservit de o fibră din constituția nervului optic. Câmpul receptor poate fi măsurat și pentru structuri din sistemul nervos central.

19.3.2. PROPRIETĂȚILE GENERALE ALE RECEPTORILOR

Specificitatea receptorilor. Generarea impulsurilor nervoase senzitivo-senzoriale reclamă interacțiunea dintre receptor și stimulul specific. Astfel, razele luminoase, după ce străbat mediile refrigerente și transparente ale ochiului, acționează asupra retinei și determină apariția senzației respective; în același context, vibrațiile sonore impresionează celulele senzoriale din organul Corti, producând o senzație auditivă caracteristică. Totuși, și alte forme de energie pot activa un sistem receptor. Aplicarea unei presiuni puternice asupra globului ocular poate să producă o senzație luminoasă, dar aceasta nu este un stimul adecvat. Se consideră, deci, stimulul specific acea formă de energie care este capabilă să activeze un receptor la intensitatea cea mai coborâtă. De fapt, cei mai mulți receptori au pragul de sensibilitate pentru o formă particulară de stimulare, traducând concepția de „specificitate a receptorului”. Aceasta se bazează pe concepția „energiei nervoase specifice”, emisă de Johannes Müller. Noțiunea de „specificitate de receptor” nu trebuie interpretată atât de rigid, întrucât se cunoaște că receptorii cutanați pentru tact, spre exemplu, răspund nu numai la atingeri ușoare, aplicate pe suprafața pielii, ci și la modificări de temperatură.

Traducerea intensității stimulului de către receptori. Este cunoscut faptul că un neuron răspunde la acțiunea unui stimul conform legii „totul sau nimic”, generând un potențial de acțiune sub acțiunea unui stimul liminal sau supraliminal. Totuși, stimularea naturală a unui receptor induce un tren de descărcări, nu numai un singur impuls. Creșterea intensității stimulului este însoțită de creșterea frecvenței potențialelor de acțiune în fibra aferentă. Sistemul nervos central poate să interpreteze aceste variații ale intensității datorită faptului că el funcționează ca un sistem capabil să moduleze frecvența în funcție de informațiile provenite nu numai de la un singur receptor, ci de la un număr variabil prin procesul de „recrutare a unităților senzoriale”, care are loc pe măsură ce intensitatea stimulului crește.

Fenomenul de adaptare. Dacă un organ de simț este stimulat timp mai îndelungat, frecvența de descărcare a unității receptoare scade la scurt timp după inițierea stimulării – fenomen numit adaptare.

Fenomenul de adaptare este explicat atât prin procese care au loc la nivelul receptorului, cât și al fibrei nervoase. În momentul acțiunii stimulului, în structura receptorului se produc anumite modificări, care sunt responsabile de apariția potențialului de receptor. Dacă stimulul acționează o perioadă mai îndelungată, se produc anumite reajustări structurale care realizează un echilibru între zona excitată și restul receptorului. Acest echilibru se perturbă din nou în momentul întreruperii stimulării, producându-se un nou potențial de receptor.

Cel de-al doilea mecanism care concurează la procesul de adaptare al receptorului este rezultatul redistribuției ionice de o parte și de alta a membranei terminației nervoase din structura receptorilor.

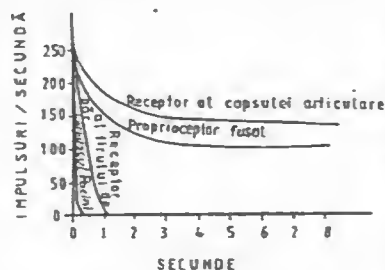


Fig. 19.9. Reprezentarea fenomenului de adaptare a diferitelor tipuri de receptori.

receptorului. Astfel, în cazul receptorilor care descarcă tonic, fibra nervoasă (terminațiile dendritice) este angajată complet pentru toată durata stimulării. Acest fapt este posibil întrucât dendritile sunt lungi și se inseră printre fibrele musculare receptoare, unde se termină.

În cazul receptorilor care se adaptează cu ușurință, intervin cel puțin două aspecte morfo-funcționale care concură la apariția facilă a procesului de adaptare: proprietățile mecanice și factorii ionici. În cazul receptorului pacinian (fig. 19.9), la acțiunea stimulului, lamele externe din constituția sa sunt deformate pe toată perioada cât acționează stimulul, în timp ce lamele interne sunt intens deformate în momentul impactului cu stimulul, pentru ca să revină rapid la starea inițială chiar dacă stimulul continuă să acționeze. În acest caz, procesul de adaptare pare să rezide în incapacitatea structurilor care vin în contact cu terminația nervoasă de a furniza informații la acțiunea prelungită a stimulului.

Cel de-al doilea mecanism incriminat interesează modificările de conductanță a membranei fibrei nervoase pentru Na^+ și K^+ . Astfel, chiar dacă partea centrală a fibrei continuă să fie excitată, extremitatea sa se acomodează treptat, probabil datorită unei redistribuiri a ionilor menționați de o parte și de cealaltă a membranei.

Mecanismul prin care receptorii tonici descarcă în mod repetat atât timp cât durează acțiunea stimulului nu este pe deplin elucidat. Apariția potențialului de receptor în terminațiile dendritice generează un potențial de acțiune propagat, care este inițial la nivelul conului de emergență al neuronului senzitiv respectiv. Acest potențial de acțiune se propagă atât ortodromic, activând întregul lanț neuronal din SNC, dar în același timp el va cuprinde și complexul pericarion-dendrite, reîntorcându-se până la nivelul terminațiilor acestora. Invazia dendritică tinde să înlăture sau să scadă valoarea potențialului de receptor până la un nivel incompatibil cu generarea potențialului de acțiune în axon. Pe măsură ce acest proces de invazie dispare, potențialul de receptor își revine valoarea capabilă să atingă pragul necesar unei noi descărcări propagate.

Dacă intensitatea stimulului extern crește, frecvența de descărcare în fibrele senzitive crește proporțional. Acest fenomen se produce întrucât nivelul de repolarizare (sau de reducere a potențialului de receptor) atinge o valoare comparabilă cu aceea care apare sub acțiunea unui stimul extern mai slab. Deci, potențialul de receptor se va dezvolta mai rapid, iar timpul necesar pentru declanșarea unei noi descărcări propagate va fi mai scurt.

Această explicație pare să fie mai aproape de realitate decât ipoteza conform căreia descărcările ritmice sunt probabil rezultatul revenirii la starea de repaus a membranei fibrei nervoase (fig. 19.10).

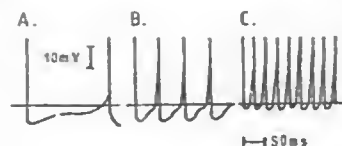


Fig. 19.10. Reprezentarea grafică a frecvenței de descărcare în funcție de intensitatea de stimulare a unui receptor de întindere. A: Intensitate prag. B: Stimulare supraliminară. C: Stimulare intensă.

19.3.3. MECANISME DE ÎNȚIERE A IMPULSULUI NERVOS LA NIVELUL RECEPTORILOR SENZITIVO-SENZORIALI

Prin utilizarea tehnicilor de electro-fiziologie, s-a creat posibilitatea studierii mecanismelor care stau la baza inițierii impulsului nervos la nivelul terminațiilor nervoase ale unor organe senzoriale.

Din interacțiunea stimul specific-organ receptor ia naștere un potențial de receptor sau „potențial generator”, care poate să rămână localizat sau să inițieze în fibra nervoasă din structura sa un potențial de acțiune ce va fi condus către centrul de integrare.

Potențialul de receptor astfel generat îmbracă toate caracteristicile unui potențial local:

- a) nu se propagă, dar se răspândește electrotonic în zonele învecinate, urmând un decrement electrotonic tipic;
- b) răspunsul poate fi gradat;
- c) nu prezintă perioadă refractară;
- d) este foarte puțin influențat de anestezicele locale, care în mod obișnuit blochează conducerea în fibrele nervoase.

Potențialul de receptor este rezultatul procesului de depolarizare care apare la nivelul terminației nervoase și care, atunci când atinge nivelul critic, poate genera conform legii „totul sau nimic” un potențial de acțiune în fibra nervoasă aferentă. Există o relație direct proporțională între mărimea potențialului generator și frecvența de descărcare în fibrele aferente.

Mecanismul de generare a potențialului de receptor este mai puțin cunoscut pentru diverse tipuri de receptori. Faptul că mecanoreceptorii de tip pacinian se pretează unei disecții fine a dat posibilitatea să se investigheze mai în detaliu procesele intime care se derulează din momentul impactului stimul-mecanoreceptor. La acești receptori, membrana terminației nervoase pare a fi sensibilă în special la deformarea mecanică. Aplicarea unei presiuni la nivelul unei zone a terminației nervoase receptoare produce anumite modificări ale proprietăților fizice ale membranei, urmate de creșterea conductanței pentru ionul de sodiu. Probabil că și alți ioni (K^+ , Cl^- etc.) sunt implicați în procesul de generare a potențialului de receptor. Deplasările ionice antrenează o schimbare bruscă a potențialului de membrană, care generează un circuit local de curent, cu o valoare proporțională cu intensitatea stimulului. Dacă liniile de forță ale potențialului dezvoltat pot să cuprindă și primul nod Ranvier de la nivelul fibrei ce se află în structura receptorului, curentul local generează potențiale de acțiune autopropagate, care se transmit saltatoriu de-a lungul fibrei, generând potențiale aferente până la sistemul nervos central.

În funcție de posibilitățile de generare a potențialelor de acțiune în fibra nervoasă, receptorii se împart în receptori care se adaptează cu ușurință și receptori tonici. Receptorii care sunt capabili să mențină un nivel relativ constant al pragului de depolarizare în terminațiile nervoase pe toată durata de stimulare sunt receptori tonici. Din acest grup fac parte atât receptorii din capsulele articulare, fusurile neuro-musculare și corpusculii Golgi, care informează SNC asupra lungimii mușchiului și a gradului de contracție musculară, cât și receptorii vestibulari, auditivi, chemoreceptorii și nociceptorii, care pot transmite informații în mod continuu, ore în șir. În cazul receptorilor care se adaptează cu ușurință, valoarea potențialului de receptor scade rapid după impactul cu stimulul adecvat, așa încât nu se mai pot genera descărcări în fibra nervoasă aferentă.

19.3.4. SISTEMUL ANEX

Cellulele receptoare sunt, de obicei, înconjurate de un ansamblu de celule epiteliale care, în afară de rol de susținere, apărare și nutriție, îndeplinesc funcții importante în captarea și modularea mai ales a amplitudinii variației energetice, fără însă să modifice calitățile specifice ale stimulului.

Pragul și viteza de repolarizare a receptorului și a porțiunii nemielinizate a fibrei nervoase și capacitățile modulatorie ale sistemului anex reprezintă calități fenotipice ale segmentului periferic. Acestea pot fi relativ ușor influențate în special de inervația efectoare din zona receptoare, în sens modulator.

Codificarea frecvenței la nivelul primului nod Ranvier este rezultatul calităților genotipice ale segmentului periferic și, de aceea, poate fi mai greu influențată.

Necesitatea existenței întregului ansamblu care alcătuiește receptorul este demonstrată și de faptul că, atunci când energia incidentă se aplică direct asupra zonei nemielinizate a fibrei aferente (deci în lipsa celulelor receptoare și a sistemului anex), scad posibilitățile prelucrării locale a mesajului și, în același timp, se instalează cu mai multă ușurință fenomenul de adaptare.

Aceste circuite reverberante de control se află sub supraveghere corticală și asigură prelucrarea cât mai adecvată a bagajului informațional în vederea adaptării organismului la mediul său de viață.

19.3.5. ANALIZA ȘI INTEGRAREA MESAJELOR SENZITIVO-SENZORIALE

Potențialele de acțiune senzitivo-senzoriale sunt preluate de la nivelul receptorilor de către dendritele primului neuron senzitiv, situat, de obicei, în afara axului cerebro-spinal.

Informațiile astfel prelucrate la nivelul receptorilor sunt conduse apoi de-a lungul axului cerebro-spinal până la nivelul ariei corticale specifice. Conducerea mesajelor senzitivo-senzoriale se face pe două tipuri de căi: specifice și nespecifice. Căile specifice cuprind un număr de trei până la șase neuroni situați în diverse etaje ale sistemului nervos central, ultima stație realizându-se la nivelul talamusului, ai căror axoni proiectează cortical. Organizarea somatotopică, observată încă din segmentele inițiale ale căilor de conducere, scoate în evidență faptul că la nivelul fiecărei etape au loc procese de analiză, a căror complexitate se accentuează pe măsură ce impulsurile abordează structuri cu diferențiere din ce în ce mai ridicată, culminând la nivelul scoarței cerebrale.

În drumul spre cortex, căile de conducere specifică emit numeroase colaterale, care, făcând sinapsă cu neuroni din formațiunea reticulată, dau posibilitatea informațiilor din mediul intern sau extern să ajungă la nivelul scoarței cerebrale și pe calea sistemului reticulat activator ascendent, cu proiecție nespecifică și difuză.

La nivelul scoarței cerebrale, fiecare neuron din zona specifică poate fi activat de un anumit număr de receptori. Influențele aferente spre neuronul cortical pot fi de tip excitator sau inhibitor, așa încât frecvența potențialelor de acțiune ale celulei centrale este continuu modulată datorită proceselor de diferențiere spațială produse prin mecanism de inhibiție laterală sau a conceptului de vecinătate.

Prin procese de convergență și de inhibiție laterală centrală se realizează contrastul și capacitatea de discriminare a câmpurilor receptoare periferice. Datorită funcției integrative a segmentului central, se pot ordona într-un sistem coerent aspectele calitative ale variației energetice care a interacționat cu sistemul senzitivo-senzorial respectiv. Relația directă între intensitatea de stimulare și caracteristicile răspunsului neuronului central, exprimată în frecvență de răspuns, arată că amplitudinea stimulului este discriminată aproximativ proporțional cu logaritmul acestei mărimi.

Procesul de adaptare apărut ca urmare a stimulării de durată este în mare măsură datorat și activității neuronilor corticali, al căror răspuns scade pe măsură ce stimularea persistă. Informațiile care parcurg rețeaua sistemului senzitivo-senzorial permit organismului uman să ia cunoștință cu mediul exterior, să deceleze eventualele agresiuni, să-și cunoască propriile limite, situația propriului corp în mediul de viață etc.

Oricare ar fi originea și natura informațiilor, ele vor avea un dublu impact în sistemul nervos. Pe de o parte, ele vor ajunge la structurile de tip analitic, unde vor fi prelucrate în mod specific în vederea elaborării senzației specifice, iar, pe de altă parte, la nivelul structurilor de integrare, unde, împreună cu alte informații, vor participa la procesele de sinteză.

Procesele integrative se realizează la diferite niveluri, în funcție de complexitatea funcțiilor pe care le pun în joc. Acestea pot fi elementare, dacă informația este destinată să mențină echilibrul intern al organismului sau să asigure controlul unui circuit reflex. Alături, ele sunt de o complexitate suficient de ridicată atunci când participă la elaborarea unei conduite emoționale sau instinctuale. În sfârșit, procesele de integrare pot fi foarte complexe când stau la originea unor procese intelectuale.

Un neuron integrator are două proprietăți particulare: prezintă multiple conexiuni senzitivo-senzoriale, motorii și vegetative și nu prezintă corespondență somatotopică. Aceste două caracteristici îl diferențiază fundamental de neuronul specific, care este monosenzorial și somatotopic. Caracterul de integrare al unui

neuron este materializat prin posibilitatea de generare de potențiale unitare, ca urmare a stimulării diferitelor modalități senzitivo-senzoriale și a apariției fenomenului de ocluzie electro-fiziologică.

Caracterul aparent nespecific al neuronilor structurilor de integrare pare să fie mai ales rezultatul solicitărilor multisenzoriale și al organizării rețelei neuronale, decât originalitatea celulei. Studiile biochimice, în plină desfășurare, par să confere acestor neuroni particularități chimice, explicate și de faptul că unele droguri modifică activitatea anumitor grupe neuronale, în timp ce altele par a fi total ineficiente în acțiunea lor.

Neuronii integratori sunt, de obicei, grupați, dar ei nu constituie întotdeauna formațiuni histologice net diferențiate. În cortexul cerebral, de exemplu, neuronii implicați în procesele de integrare senzorială pot evoca potențiale de acțiune la nivelul structurilor specifice.

Deși fiecare structură de integrare posedă un rol particular în ansamblul funcțional al sistemului nervos central, se pot desprinde însă anumite caractere generale comune acestora: plasticitatea funcțională, rolul modulator, controlul reciproc. Datorită plasticității funcționale, două mesaje nervoase de aceeași origine și intensitate pot avea valoare și semnificație diferite, în funcție de starea de excitabilitate a structurii de integrare.

Funcția modulatoră a sistemelor integrative se exercită datorită controlului permanent asupra activităților nervoase, prin jocul influențelor inhibitoare sau facilitatoare. Între activitatea acestor structuri există relații de influențare reciprocă prin mecanisme de *feed-back* pozitiv și negativ.

19.4. SENSIBILITATEA EXTEROCEPTIVĂ

Pielea cuprinde un ansamblu de structuri dispuse în trei straturi: epiderm, derm și bipoderm. Unele regiuni ale pielii sunt acoperite cu păr, altele nu prezintă astfel de diferențieri, alcătuind pielea glabă. Toate straturile pielii conțin o varietate largă de organe receptoare, constituind așa-numita clasă a exteroceptorilor. Unii dintre aceștia sunt reprezentați de terminații nervoase libere amielinice, iar alții prezintă o structură complexă, terminația nervoasă fiind înconjurată de structuri non-neurale, îmbrăcând aspectul de corpusculi (fig. 19.11).

La nivelul pielii glabre se întâlnesc: terminații nervoase libere, discuri tactile Merkel, corpusculi Krause, Meissner, Ruffini și Pacini, iar în pielea acoperită cu păr se găsesc: receptori anexați foliculului pilos, discuri Merkel și corpusculi Ruffini.

Mucoasele conțin receptori având aceleași caracteristici ca și receptorii cutanați, existând posibilitatea traducerii stimulilor de atingere, temperatură, durere etc.

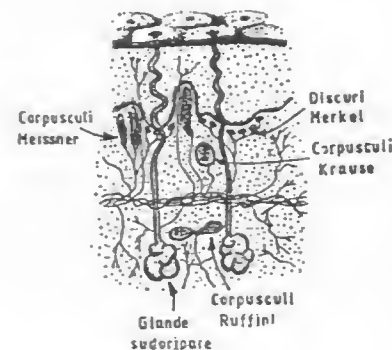


Fig. 19.11. Distribuția diferitelor categorii de exteroceptori (Mountcastle, Medical Physiology, 1968).

Stimularea receptorilor cutanați poate genera senzații de atingere, presiune, vibrație, variație termică etc. Stimularea mecanică inofensivă a pielii determină senzația de atingere. Dacă se apasă pielea cu un stilet și această manevră persistă, senzația se păstrează o perioadă de timp, dar scade treptat, dispărând după câteva minute. În cazul în care apăsarea stiletului este mai puternică, astfel încât să se producă modificări și în țesutul subcutanat, senzația poate persista mai multe minute, fiind cunoscută sub denumirea de „presiune profundă”. Dacă pielea este antreotată în mișcări oscilante rapid repetate (frecvență mai mare de 10–20 c/s), apare senzația de vibrație, iar când un obiect este mișcat ușor și încet deasupra pielii, se produce senzația de gădilar.

Creșterea temperaturii pielii cu mai mult de 0,2°C produce senzația de căldură, iar scăderea temperaturii, senzația de rece. Dacă variațiile termice depășesc temperatura de 45–46°C sau scad sub 10°C apare senzația de durere. Stimularea mecanică și chimică care produce o iritație sau leziuni cutanate determină, de asemenea, senzația de durere. Dacă însă leziunile cutanate, așa cum se întâmplă în cazul unor procese inflamatorii, ou produc durere, apare senzația de mâncărime.

Din cele prezentate anterior, rezultă că pielea umană conține receptori care semnalizează: (1) modificări mecanice cu caracter inofensiv sau sub formă de noxă; (2) modificări termice ușoare sau drastice, cu caracter de durere. Aceste modalități de semnalizare a variațiilor energetice cu care pielea poate veni în contact poartă numele de exterocepție, iar structurile capabile să traducă astfel de stimuli fac parte din grupurile mecanoreceptorilor, termoreceptorilor și nociceptorilor.

Mecanoreceptorii sunt structuri capabile să genereze potențiale de acțiune cu frecvență ridicată, proporțională cu intensitatea stimulilor mecanici inofensivi.

Termoreceptorii răspund prin descărcări de frecvență ridicată la stimuli inofensivi. Se cunosc două tipuri de termoreceptori: unii sunt capabili să sesizeze creșterea, iar cel de al doilea tip, scăderea temperaturii cutanate.

Receptorii pentru detectarea variațiilor termice superioare temperaturii cutanate sunt reprezentați de terminații oerovase libere amielinice și în mai mică măsură prin fibre nervoase mielinizate, subțiri. Acești receptori descarcă impulsuri din momentul în care temperatura cutanată a organismului depășește valoarea de 35°C. Cei mai mulți receptori generează potențiale în timpul creșterii temperaturii și foarte puțini prezintă descărcări susținute. Dacă temperatura cutanată prezintă o nouă creștere, se observă o nouă modificare a frecvenței de descărcare în timpul și puțin după instalarea ouvelului termic nou (componenta fazică), concomitent apărând și descărcări susținute (componenta tonică). Când temperatura atinge valori de 45–47°C, componenta tonică înregistrează un vârf de activitate, la care se asociază și o semnificativă creștere a frecvenței potențialelor.

Receptorii pentru rece la primă aparțin aproape în exclusivitate fibrelor nervoase mielinizate. Activitatea acestora este complementară termoreceptorilor pentru cald, în sensul că ei prezintă o activitate tonică inițială. Cele mai multe fibre descarcă impulsuri la o temperatură cuprinsă între 15–30°C, cu un vârf de activitate între 2° și 30°C.

Cei mai mulți receptori pentru rece nu răspund la temperaturi mai mari de 35°C, până când acestea nu ating valori de 43–47°C. La aceste valori, când temperatura prezintă acțiuni nocive, termoreceptorii pentru rece încep să descarce impulsuri în mod „paradoxal”. S-a observat că și termoreceptorii pentru cald descarcă impulsuri în mod paradoxal, dar frecvența lor de descărcare este foarte redusă, iar numărul lor este cu totul restrâns.

Nociceptorii ou răspund decât atunci când stimulii nociceptivi ating intensități care produc leziuni biochimice, funcționale sau morfologice în țesuturile conținătoare sau când excitantul are intensitate foarte apropiată de aceștia din urmă.

În funcție de natura stimulului care poate genera potențiale de acțiune, receptorii pielii hirsute se clasifică în: (1) receptori de detecție a poziției; (2) receptori de viteză; (3) receptori pentru accelerație.

O poziție constantă a stimulului poate fi obținută prin deplasarea bruscă a pielii într-o nouă poziție. Acești receptori prezintă un vârf de descărcări în momentul acțiunii stimulului, după care rata de activare scade.

Receptorii de viteză, reprezentați de corpusculii Meissner, răspund dependent de bruschețea de deformare a pielii și se adaptează relativ lent. Un tip particular al acestora îl reprezintă receptorii anexați

firului de păr, care descarcă numai în timpul mișcării tijei; reținerea părului în poziția nouă este urmată de încetarea generării potențialelor de acțiune. Frecvența descărcărilor este direct proporțională cu viteza de deplasare a firului de păr.

Receptorii care detectează accelerația, de tipul corpusculilor Pacini ce descarcă în momentul variației intensității stimulului, au frecvența de activare proporțională cu mărimea variației energetice. Acești receptori se adaptează foarte repede și nu transmit informații despre profunzimea și viteza de acțiune a stimulului.

19.4.1. ANALIZA ȘI INTEGRAREA INFORMAȚIILOR EXTEROCEPTIVE

Informațiile preluate din mediul înconjurător de către exteroceptori generează senzația specifică prin prelucrarea adecvată la ouelul scoarței cerebrale. Aceste impulsuri ou ajung însă în mod direct la ouelul scoarței, iotrucât, în mod obișnuit, între periferie și cortex se interpoou mai multe stații de releu care fac parte din sistemul somestezic.

Toate fibrele nervoase care provin de la nivelul exteroceptorilor sunt dendrite ale neuronilor senzitivi extranevrali, cu sediul fie în ganglionii spinali de pe rădăcioa posterioară a nervilor spinali sau în omologii lor de pe traseul nervilor cranieni. Axonii acestor neuroni pătrund în nevrx. Cea mai mare parte a fibrelor groase (A-beta) iotără în cordooul posterior. Fibrele senzitive mai subțiri (A-delta și C) ca, de altfel, și colateralele fibrelor groase, după ce urcă sau coboară pe parcursul câtorva metamere, fac siopasă cu deutoneuronul din cornul posterior, iar axonii acestor neuroni dau oaștere câilor spino-talamice ototero-laterale. Această separare a fibrelor, încă din porțiunile incipiente ale câilor de conducere, materializează prelucrarea adecvată a informațiilor, dând naștere celor două compartimente: sistemul cordoanelor posterioare și sistemul spino-talamic.

Sistemul cordoanelor posterioare cuprinde fibre mielinizate, groase, cu viteză mare de conducere (35–70 m/s), având o orientare spațială în raport cu originea lor periferică. Sistemul spino-talamic ioclude fibre oerovase subțiri, unele nemielinizate, cu viteza de conducere redusă (1–15 m/s). Aceste diferențe trădează caracterul informațiilor senzitive care sunt conduse de cele două sisteme. Informațiile care trebuie transmise rapid, cu fidelitate temporară și care detectează diferențe minime de intensitate sunt transmise pe calea sistemului cordoanelor posterioare. De asemenea, sistemul cordoanelor posterioare conduce impulsuri care informează sistemul nervos central în legătură cu localizarea precisă a unor puncte de pe suprafața organismului. Spre deosebire de sistemul cordoanelor posterioare, care transmite doar informații mecano-receptive, sistemul spino-talamic transmite un evantai larg de informații somestezice (tact difuz, cald, rece, durere).

19.4.1.1. Transmiterea informațiilor pe calea sistemului cordoanelor posterioare

Sistemul cordoanelor posterioare este alcătuit din trei neuroni (fig. 19.12). Primul neuron se găsește în ganglionii senzitivi extranevrali. Axonii acestora, pătrunzând în nevrx, în cordoanele posterioare, ao traseu ascendent spre nucleii coloanei dorsale (gracilis și cuneatus) de la nivelul bulbului rahidian. Orientarea spațială somatotopică are loc încă de la acest nivel.

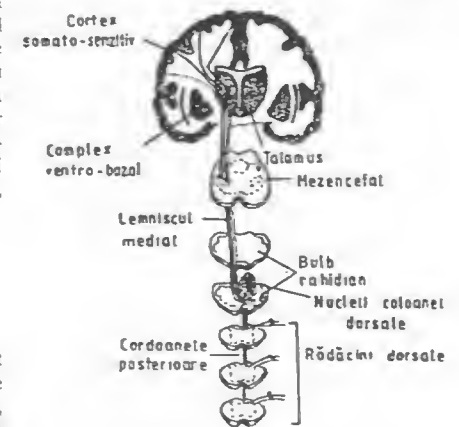


Fig. 19.12. Diagrama sistemului cordoanelor posterioare.

Astfel, fibrele din regiunile inferioare ale corpului au localizare centrală, iar fibrele din segmentele lombare, toracice și cervicale se adaugă succesiv acestora din urmă, ocupând partea laterală a sistemului.

Al doilea neuron este situat la nivelul bulbului rahidian, iar axonul său, după ce se încrucișează la scurtă distanță de la emergență, se îndreaptă spre talamus pe calea lemniscului median, terminându-se în nucleul ventro-bazal.

Neuronii din nucleii coloanei dorsale prezintă un grad ridicat de specificitate, iar descărcările mimează activitatea diferitelor clase de receptori periferici. Câmpul receptor al deutoneuronului este mai larg decât al protoneuronului, la acest nivel realizându-se importante fenomene de convergență. În același timp, întrucât foarte mulți neuroni din nucleii coloanei dorsale pot fi activați de impulsuri provenite de la un singur câmp receptor, au loc multiple procese de divergență. Datorită proceselor de convergență și divergență care se petrec la acest nivel, nucleii coloanei dorsale contribuie la acuitatea discriminării periferice. În realizarea acestor procese sunt incriminate două mecanisme: (1) inhibiția presinaptică și (2) inhibiția recurentă colaterală. Împreună, aceste mecanisme realizează așa-numitul fenomen de inhibiție laterală.

Inhibiția presinaptică este realizată prin intermediul unui interneuron excitator, care este activat prin colateralele fibrelor aferente primare. Axonii interneuronului fac sinapsă cu deutoneuronul în apropierea terminațiilor fibrelor aferente primare. Activarea interneuronului induce o depolarizare prelungită a membranei axonilor neuronului primar, așa încât potențialul de acțiune care ajunge în porțiunea terminală va avea o amplitudine mai redusă și, în consecință, se va elibera o cantitate mai mică de mediator chimic. Rezultatul reducerii cantității de mediator eliberat se materializează printr-un potențial postsinaptic excitator (PPSE) mai mic la nivelul membranei postsinaptice. În aceste circumstanțe, probabilitatea de activare a deutoneuronului este mai redusă, datorită fenomenului de inhibiție presinaptică (fig. 19.13. A).

Cel de-al doilea mecanism care concurează la procesul de localizare somestezică se realizează prin intermediul colateralelor celui de-al doilea neuron, care activează un interneuron inhibitor. Acesta va acționa prin mecanism de *feed-back* asupra deutoneuronului (fig. 19.13. B). În mod normal, impulsul aferent este capabil să genereze potențialul de acțiune la nivelul deutoneuronului. Dar, dacă impulsul aferent ajunge odată cu potențialul inhibitor generat de fibrele recurente, nu este suficient ca PPSE astfel generat să atingă valoarea prag pentru generarea unui nou *spike*-potențial și, deci, deutoneuronul nu va fi capabil să transmită impulsul aferent. Acest fenomen de inhibiție recurentă limitează procesele de divergență, contribuind la creșterea acuității de transmitere a informației.

Limitând procesele de convergență, prin intermediul inhibiției presinaptice primare, și a celor de divergență, prin inhibiție recurentă, inhibiția laterală reprezintă o modalitate comună de adâncire a procesului de discriminare periferică.

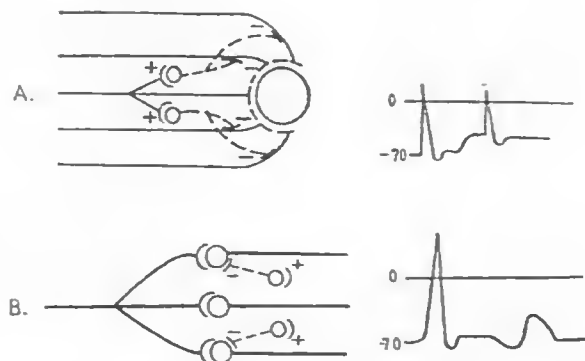


Fig. 19.13. A: Mecanismul inhibiției presinaptice. B: Inhibiția prin colaterale recurente.

Al treilea neuron al căilor exteroceptive se află în complexul ventro-bazal al talamusului, iar axonul său proiectează în cortexul somato-senzitiv ipsilateral. Cea mai mare parte a fibrelor lemniscului medial face sinapsă în nucleul ventral postero-lateral (VPL) și doar o mică parte în nucleul ventral postero-medial (VPM).

Studii electro-fiziologice au precizat că există o organizare somatotopică cu reprezentare tridimensională a hemicorpului controlateral. Replica talamică a imaginii corpului este distorsionată. Capul, fața, degetele și mâna sunt mult mai larg reprezentate decât trunchiul și părțile proximale ale membrilor. La acest nivel, extremitatea cefalică ocupă partea mediană, iar zonele inferioare ale corpului, regiunile laterale ale VPL.

Alături de specificitatea somatotopică, neuronii complexului ventro-bazal prezintă o mare specificitate pentru celelalte căi.

Caracteristica funcțională cea mai importantă a căilor sistemului cordoanelor posterioare este fidelitatea de transmitere, înțelegându-se prin aceasta că, de fiecare dată când se stimulează un punct periferic, se generează un semnal care este condus până la nivelul cortexului somestezic. Dacă intensitatea stimulului crește, are loc o creștere proporțională a descărcărilor și la nivelul scoarței cerebrale. În sfârșit, stimularea unei zone precise de pe suprafața corpului determină activare neuronală într-o zonă corespunzătoare de la nivelul scoarței cerebrale.

În cazul creșterii intensității stimulului, deși plaja de activare neuronală din sistemul somestezic crește datorită fenomenelor de divergență, frecvența de descărcare cea mai mare o prezintă neuronii din porțiunea centrală a ariei corticale la care este racordat receptorul respectiv. De asemenea, când se stimulează un receptor cutanat, este excitat mai intens un anumit punct de la nivelul cortexului somestezic, deși un oarecare grad de activare se observă și în zonele vecine, dar acestea sunt mai puțin intens stimulate. Astfel, cortexul senzitiv poate detecta localizarea precisă a semnalelor care ajung de la periferie.

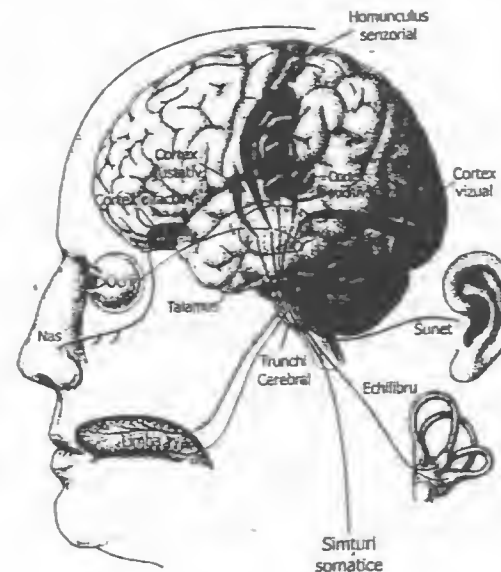


Fig. 19.14. Protecția corticală a principalelor căi senzoriale.

19.4.1.2. Cortexul somato-senzorial

Segmentul final al sistemului cordonelor posterioare la primat este situat în lobul parietal (sulcus centralis). La acest nivel proiectează axonii neuronilor din complexul ventro-bazal al talamusului ipsilateral (radiațiile talamo-corticale). În realitate, proiecțiile somestezice talamo-corticale se realizează în două regiuni ale lobului parietal, cunoscute sub numele de arie somato-senzitivă primară (SI) și secundară (SII). Aria somato-senzitivă I se întinde pe o zonă mai largă, cuprinzând girusul postcentral, în timp ce aria somestezică secundară – partea laterală a girusului postcentral, adiacentă lobului temporal este închisă de scizura Sylvius (fig. 19.14).

Aria somato-senzitivă primară primește proiecția aferentelor specifice de la complexul talamic ventro-bazal. Și la acest nivel există o reprezentare somatotopică a suprafeței controlaterale a organismului. În această zonă, suprafața controlaterală a corpului se proiectează punct cu punct, reprezentarea (*homunculus senzitiv*) fiind proporțională cu densitatea receptorilor periferici.

Aria somato-senzitivă primară prezintă o organizare funcțională neuronală columnară, perpendicular pe suprafața scoarței. Această dispoziție dă posibilitatea neuronilor dintr-un anumit strat să realizeze legături funcționale cu neuronii din straturile imediat supra- sau subiacente. Funcțiile acestor coloane neuronale sunt mai puțin bine precizate, dar se cunoaște că:

- a) semnalele senzitive aferente activează mai întâi neuronii din stratul IV pentru ca, apoi, informația să fie transmisă către straturile superficiale și profunde;
- b) straturile I și II primesc influxuri difuze și nespecifice, conduse prin formațiunea reticulată, cu rol în menținerea unui nivel de excitabilitate corticală;
- c) neuronii din straturile V și VI trimit axoni în alte zone corticale și la talamus, trunchi cerebral și chiar la nivel medular.

Aria somato-senzitivă secundară prezintă, de asemenea, o organizare somatotopică. Dar, spre deosebire de aria SI, la acest nivel există o reprezentare bilaterală.

Organizarea funcțională columnară a ariei SII este mixtă, în sensul că unele unități răspund specific doar la un anumit tip de stimuli cu strictă localizare, în timp ce alte unități pot fi activate de mai multe tipuri de stimuli și de pe o largă arie a suprafeței corporale. Acest aspect funcțional pare a fi rezultatul faptului că aria SII primește proiecții nu numai de la nivelul complexului talamic ventro-bazal, ci și de la zone mai posterioare ale nucleilor talamici, unde se găsește releul sistemului lemniscal spinal.

Sistemul cordonelor posterioare conduce impulsuri care informează asupra impactului tactil, ce necesită un grad ridicat de localizare și intensitate a stimulului.

Discriminarea spațială. Testarea capacității tactile a unui subiect se realizează prin „capacitatea de discriminare spațială”. Stimularea concomitentă a două puncte la nivelul suprafeței cutanate poate genera impresia stimulării doar a unui punct sau a două puncte diferite, în funcție de distanța dintre zonele stimulate și de regiunea stimulată. Astfel, la nivelul degetelor mâinii, distanța minimă capabilă să producă senzația stimulării a două puncte diferite se obține chiar dacă între zonele stimulate există o depărtare doar de 2 mm, în timp ce în zona dorsală a trunchiului acestea trebuie să fie distanțate între 20 și 50 mm. Acest proces este rezultatul faptului că zonele cutanate care prezintă un grad ridicat de discriminare spațială sunt larg reprezentate la nivelul ariei SI și invers în cazul suprafețelor care au capacitate discriminativă redusă.

Analizând reprezentarea corticală a stimulării celor două puncte cutanate, se observă că zona rezultantă are două vârfuri de descărcare maximă, separate printr-o depresie care permite cortexului senzitiv să detecteze prezența celor două puncte stimulate.

Informarea rapidă asupra modificărilor periferice. Sistemul cordonelor posterioare este capabil să informeze în timp util orice modificare survenită la nivel periferic. Acest sistem poate să răspundă în mod adecvat la frecvențe de acțiune ale stimulului între 100 și chiar 400-500 de cicli pe secundă. Maniera respectivă de răspuns permite îndreptarea imediată a atenției spre zona respectivă și declanșarea unor reacții adecvate pentru evitarea pericolelor.

19.4.1.3. Transmiterea informațiilor pe calea sistemului lemniscal spinal (sistemul cordonelor antero-laterale)

Sistemul cordonelor antero-laterale, sau spino-talamic, conduce semnale care nu reclamă o localizare precisă și nici viteză mare de conducere. Prin intermediul acestor căi sunt conduse: informațiile nociceptive, excitațiile termice (cald și rece), senzațiile de contact brusc, presiune cu capacitate redusă de localizare și

discriminare a intensității, gâdile, prurit și cele sexuale. Pe baza unor criterii filogenetice și funcționale sistemul lemniscal spinal cuprinde mai multe părți: (1) lemniscul neospinal (tractul neospino-talamic); (2) lemniscul paleospinal (tractul paleospino-talamic); (3) lemniscul arhispinal (tractul spino-reticular). Fibrele care intră în constituția acestor tracturi fac parte din grupa A-delta (mielinizate) și C (nemielinizate).

Primul neuron al acestor căi se află în ganglionul spinal, axonul acestuia în cornul posterior medular, unde face sinapsă cu deutoneuronul căii, spre cel de al treilea neuron, cortical.

Distribuția ulterioară a fibrelor sistemului lemniscal spinal este diferită (fig. 19.15). Astfel, axonul deutoneuronului tractului neospino-talamic, după ce se încrucișează, intră în cadranul antero-lateral medular și se termină în porțiunea caudată a complexului ventro-bazal talamic, unde se distribuie somatotopic.

Axonii neuronilor talamici proiectează strict somatotopic în aria somato-senzitivă principală, în funcție de tipul de informații conduse. În cazul căilor lemniscului paleospinal, aferențele primare pătrund în cornul dorsal medular și realizează sinapsă cu un număr variabil de interneuroni. Axonii interneuronilor pătrund în cadranul antero-lateral medular de partea opusă și se termină în nucleii posteriori ai talamusului dorsal și în grupul nuclear intralaminar. Axonii neuronilor din nucleul talamic posterior proiectează în aria somato-senzitivă secundară, prezentând un anumit grad de repartitie somatotopică, în timp ce axonii neuronilor din grupul intralaminar se distribuie difuz la nivelul lobilor frontal și parietal. Căile paleospino-talamice au reprezentare bilaterală la nivelul cortexului cerebral și nu realizează o organizare somatotopică. Căile arhispino-talamice sunt cele mai vechi din punct de vedere al evoluției ontogenetice. Fibrele aferente spinale emit numerele colaterale, care fac sinapsă cu interneuroni din substanța cenușie medulară. Axonii interneuronilor proiectează bilateral atât prin sistemul propriospinal, cât și prin fibre care intră în cadranul medular antero-lateral, terminându-se difuz în formațiunea reticulată bulbo-pontină. Axonii neuronilor reticulați fac sinapsă în diferiți nuclei talamici, care proiectează difuz la nivelul scoarței cerebrale.

Natura exactă a caracterelor transmisiei pe calea sistemului lemniscului spinal nu este la fel de bine cunoscută ca în cazul sistemului cordonelor posterioare. În afara faptului că cele două sisteme conduc impulsuri cu caracter informațional diferit, ambele tipuri de căi transmit informații mecanoreceptoare, dar, în timp ce căile sistemului cordonelor posterioare transmit informații mecanoreceptoare cu caracter critic, fasciculul spino-talamic anterior conduce impulsuri mecanoreceptoare de tip frust.

În sfârșit, este subliniat faptul că informațiile exteroceptive de la nivelul feței și capului sunt preluate de dendrite ale neuronului senzitiv al nervului trigemen. Axonii protoneuronilor pătrund în trunchiul cerebral la nivel pontin, după care se împart într-un subgrup ascendent, ce se termină în nucleul senzitiv al trigemenului, și unul descendent, care face sinapsă în nucleul spinal al nervului V. După încrucișare, axonii deutoneuronilor fac sinapsă în complexul talamic ventro-bazal de partea opusă, iar neuronii talamici proiectează în aria somato-senzitivă corticală primară prezentând distribuția somatotopică și specificitatea de stimulare (fig. 19.16).

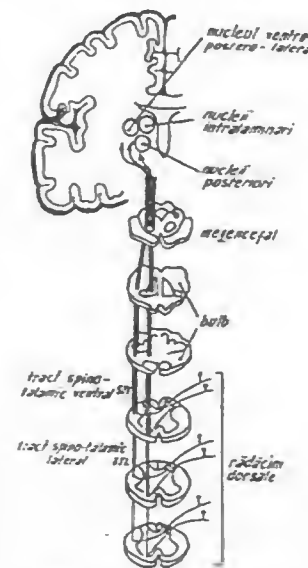


Fig. 19.15. Reprezentarea grafică a sistemului lemniscal spinal.

19.5. SENSIBILITATEA INTEROCEPTIVĂ

Sensibilitatea interoceptivă este asignată de receptori viscerali și căile senzitive vegetative spino-reticulo-talamo-corticale. În general, viscerele nu sunt dotate cu formațiuni receptoare specializate. Ele își dădorec sensibilitatea, în majoritatea cazurilor, terminațiilor nervoase libere din parenchimul sau vasele

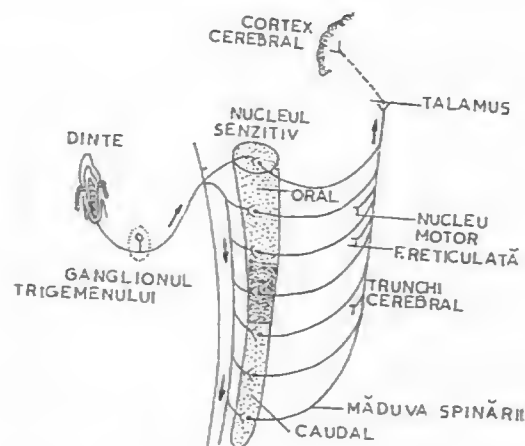


Fig. 19.16. Sistemul aferent trigeminal.

organului respectiv. Excepție fac doar baro- și chemoreceptorii de la nivelul zonelor reflexogene, precum și voloreceptorii cardiaci și mecanoreceptorii pulmonari, discutați la reglarea activităților cardio-vasculare și respiratorii. Fibrele senzitive (dendritice) plecate de la nivelul viscerelor merg pe traiectul nervilor simpatici și parasimpatici până la ganglionii spinali, unde are sediul corpul celular al protoneuronului căii aferente interoceptive. În cazul aferențelor vagale, corpul celular al primului neuron senzitiv se găsește în ganglionul nodos. Axonii protoneuronilor respectivi pătrund împreună cu rădăcinile dorsale ale nervilor spinali în coarnele posterioare ale măduvei, pentru a se articula atât cu deutoneuronul căii aferente interoceptive, cât și cu cel de-al doilea neuron al căii senzitive exteroceptive. Calea aferentă vegetativă urcă de-a lungul substanței cenușii perpendimare, traversând rețelele polineuronale ale acesteia, până în formațiunea reticulată a trunchiului cerebral. De aici, calea vegetativă a sensibilității viscerele străbate rețeaua polisinpatică a formațiunii reticulate ascendente pentru a ajunge la nucleii reticulați talamici și a proiecta difuz mesajele interoceptive pe întreaga suprafață a scoarței cerebrale. Datorită acestui fapt, stimularea receptorilor viscerali determină potențiale evocate simultan în diferite arii corticale.

Fibrele căii aferente interoceptive care au făcut sinapsă cu neuronii medulari exteroceptivi vor transmite informațiile preluate de la viscere spre scoarța cerebrală pe calea specifică spino-talamo-corticală laterală a sensibilității termo-algezice. Întrucât fibrele senzitive cutanate și viscerele converg spre aceiași neuroni ai căii aferente spino-talamice, durerea viscerală va fi resimțită și într-un alt teritoriu cutanat decât cel care corespunde topografic viscerului respectiv. Ca exemplu poate fi dată convergența în măduvă a fibrelor care transportă stimulii nocivi de la nivelul cordului cu cei ce conduc excitațiile de pe marginea internă a membrului superior stâng și din regiunea precordială. De aceea, durerea cardiacă este resimțită precordial și pe marginea cubitală a antebrațului. Numeroase alte exemple de durere reflectată oferă practica medicală.

19.6. SENSIBILITATEA PROPRIOCEPTIVĂ

Transpusă inițial la ansamblul de senzații provenite de la receptorii articulari care însoțesc și conștientizează starea pozițională și de mișcare a unui segment de corp, noțiunile de sensibilitate kinetică și analizator kinestezic capătă un înțeles mult mai larg și precis, odată cu includerea în cadrul acestora a receptorilor fusali musculari și tendinoși.

Deși s-au făcut numeroase investigații pe baza unui arsenal variat de tehnici moderne, datele acumulate până în prezent nu conturează o idee unitară asupra structurilor și mecanismelor prin care propriocepția kinestezică creează o imagine obiectivă asupra întregului corp în diversele sale momente de solitare statică și dinamică.

Câteva aspecte privind proprioceptorii, căile de transmitere și proiecțiile lor cortico-subcorticele, pe de o parte, cât și mecanismele kinestezice și implicațiile lor funcționale, pe de altă, se impun în consensul locului pe care îl ocupă astfel de informații în perfecționarea diverselor deprinderi și acte motorii, ca procese obligatorii în adaptarea organismului la mediu.

19.6.1. RECEPTORII KINESTEZICI

Considerați ca mecanoreceptorii ai sistemului locomotor, în acest grup sunt incluși atât receptorii articulari, reprezentanți de corpusculii Ruffini, organele Golgi articulare și corpusculii Vater-Pacini modificați, alături de corpusculii Pacini paraarticulari, cât și receptorii musculari reprezentați de fusurile neuromusculare și organele tendinoase Golgi.

Receptorii articulari. Corpusculii Ruffini. Dintre toți receptorii, aceștia sunt cel mai frecvent întâlniți, fiind situați în țesutul conjunctiv al capsulei articulare; ei sunt capabili de a suporta deformările produse în diferite direcții în care articulația este mobilizată. Ca receptori cu adaptare lentă din punct de vedere electro-fiziologic, corpusculii Ruffini sunt sensibili atât la schimbările de poziție, cât și la cele de direcție a mișcării, prezentând o activitate electrică spontană permanentă. De aici și noțiunea de poziție a unui membru în stare de imobilitate, frecvența descărcărilor în timpul mișcării fiind în funcție de rapiditatea și amplitudinea acesteia.

Activitatea unor astfel de corpusculi și, deci, sensibilitatea lor sunt modulate prin contracția mușchilor cu inserție pericapsulară.

Corpusculii Golgi. Situați în ligamente, funcția lor este apropiată de cea a corpusculilor Ruffini. Spre deosebire de aceștia, ei nu sunt influențați de contracția mușchilor pericapsulari, fiind sensibili în special la variațiile posturale și foarte puțin la mișcare.

Înregistrările unor biopotențiale de receptor au evidențiat existența unor descărcări care variază cu poziția articulației, prezentând o adaptare foarte lentă.

Corpusculii Pacini. Dispuși, de asemenea, la nivelul ligamentelor articulare, aceștia sunt foarte sensibili la mișcări rapide și la vibrații. După unii autori (Skoglund), corpusculii Pacini ar putea fi considerați ca veritabili detectori de accelerație.

Receptorii musculo-tendinoși. Fusul neuro-muscular. Reprezintă o formațiune proprioceptivă dispusă în paralel cu fibrele musculare striate extrafusale, conținând un număr de 2-10 fibre (intrafusale), cu nuclei concentrați în regiunea ecuatorială „mio-tubulară”.

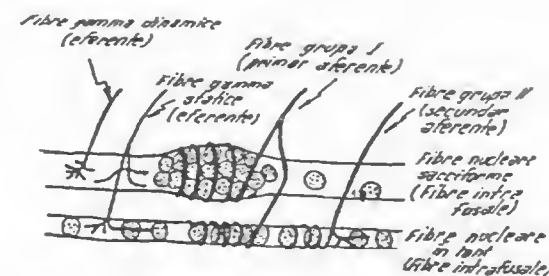


Fig. 19.17. Legăturile fibrelor nervoase terminale cu fibrele musculare sacciforme și cu fibrele musculare nucleare în lanț (Guyton, 1976).

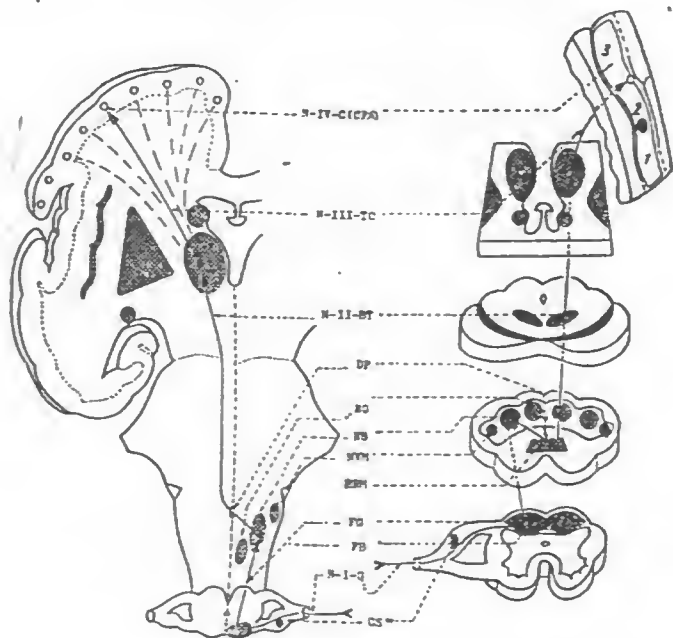


Fig. 19.18. Căile sensibilității mio-artrokinetice conștiente. GS, ganglion spioal. N-I-G, primul ganglion ocrural (periferic). FB-NB, fascicul și nucleu Burdach. FG-NG, fascicul și nucleu Goll. BRM, banda Reil mediană. NVM, nucleul von Monakow. DP, decusația piriformă. N-II-BT, al doilea neuron bulbo-talamic. N-III-TC, neuronul talamo-cortical. N-IV-C (CPA), neuronul din circumvoluțiunea parietală ascendentă.

Actualmente, se vorbește de existența a două tipuri de fibre intrafusale la nivelul fusului neuromuscular la mamifer, și anume (fig. 19.17) fibre în care îngrămădirea nucleilor este asociată cu o dilatare a zonei centrale, denumite *fibre cu sac nuclear*, și fibre în care nucleii au o dispoziție în șir unic, denumite *fibre cu lanț nuclear*, fiind atașate lateral primelor.

Ambele tipuri de fibre prezintă o inervație senzitivă primară de conducere rapidă, reprezentată de fibre aferente de tip Ia, prin care sunt transmise informațiile kinestezice musculare privind gradul de întindere, permițând o permanentă adaptare tonică de postură și mișcare la variația lungimii și vitezei de întindere musculară. Se discută și prezența unor aferențe secundare de tip II atașate fibrelor cu lanț nuclear, care ar semnaliza doar alungirea instantanee a mușchiului.

Inervația motorie a fibrelor intrafusale este asigurată prin două tipuri de fibre eferente gamma, și anume: fibre gamma „dinamice”, terminate „în placă” pe fibrele intrafusale cu sac nuclear, și fibre gamma „statice”, terminate „cuadrilat” pe fibrele intrafusale cu lanț nuclear.

Organele tendinoase (corpusul Golgi). Plasate în serie cu fibrele musculare în intimitatea tendoanelor, acestea sunt constituite dintr-o bogată rețea de terminații nervoase, care vehiculează spre axul cerebro-spinal informația kinestezică asupra variațiilor tensiunale musculo-tendinoase, prin intermediul unor aferențe senzitive de conducere rapidă de tip Ib.

19.6.2. CĂILE DE TRANSMISIE A PROPRIOCEPȚIEI KINESTEZICE

Având dublă origine, articulară și musculo-tendinoasă, informațiile kinestezice sunt dirijate de-a lungul axului cerebro-spinal, pe de o parte, prin calea lemniscală rapidă a sensibilității superficiale tactile și profunde proprioceptive conștiente și, pe de altă, prin calea lentă extralemniscală de conducere a sensibilității proprioceptive inconștiente.

Sensibilitatea mio-artrokinetică conștientă. Împrumutând calea lemniscală proprioceptivă conștientă, informația kinestezică este vehiculată spre cortex prin intermediul a patru neuroni: periferic, nucleu-talamic, talamo-cortical și intracortical. Cu origine în ganglionul rahidian, primul neuron culege informațiile artrokinestezice conștiente de la nivelul receptorilor Pacini și Golgi, prin intermediul unor terminații senzitive din grupul I (11–12 μ m) și pe cele de la nivelul receptorilor Ruffini, prin terminații aferente din grupul II (7–10 μ m).

Terminațiile axonale ale neuronilor ganglionari sunt grupate în fasciculele Goll și Burdach, care, prin intermediul releului sinaptic bulbar, transmit mai departe informația artrokinetică celui de-al II-lea neuron bulbo-talamic controlateral.

După ultimul releu în nucleul ventro-postero-lateral al talamusului, sensibilitatea artrokinetică urmează drumul celei tactile epicritice, prin intermediul celui de-al III-lea neuron talamo-cortical, până la nivelul circumvoluțiunii parietale ascendente (ariile S_1 și S_2) (fig. 19.18).

Cu organizare asemănătoare ariei S_1 , aria S_2 prezintă în plus o bilateralitate a reprezentărilor senzitive, având o densitate mai redusă a proiectelor tactokinetic.

O parte a sensibilității proprioceptive conștiente face sinapsă în nucleul Von Monakow bulbar, fiind deviată spre cerebel, aducând un plus de informații la acest nivel, alături de unele aferențe ale sensibilității superficiale, care sunt dirijate spre aceleași arii corticale S_1 , S_2 .

Sensibilitatea miokinetică inconștientă. Pe calea extralemniscală a sensibilității proprioceptive inconștiente sunt transmise influxurile determinate de întinderea musculo-tendinoasă, prin intermediul unor fibre nervoase cu diametru mare (10–20 μ m) și cu o viteză de conducere dublă celor pentru sensibilitatea proprioceptivă conștientă.

Descărcările influxurilor nervoase modulate în frecvență sunt dirijate, prin aferențele la și, respectiv, Ib ale primului neuron cu sediul în ganglionul rahidian, spre măduvă unde, după primul releu sinaptic (coloana Clarke și nucleul Bechterew), iau calea fasciculelor spino-cerebeloase directe (Flechsig) și încrucișat (Gowers), pentru a ajunge la nivelul paleocerebelului, considerat, după cum se știe, un veritabil creier proprioceptiv.

Prin eferențele sale extrapiramidale subcortice și corticale, informațiile miokinetică sunt preluate de sisteme reglatoare ale activității tonice musculare, ajungând în zona de proiecție corticală precentrală datorită vitezei mari de conducere, odată cu sensibilitatea proprioceptivă conștientă.

19.6.3. MECANISME ȘI IMPLICAȚII ALE PROPRIOCEPȚIEI KINESTEZICE

După introducerea termenului de kinestezie (Bastian, 1885), legat în special de simțul muscular al mișcării și cel de propriocepție (Sherrington, 1894), numeroși autori au fost atrași în studiul mecanismelor intime care asigură acest simț al „poziției” și „mișcării”. În acest sens, unii au considerat kinestezia ca „simț al forței” (Weber), alții ca „analizator detaliat al spațiului și timpului” (Scecnov), pentru ca, mult mai târziu, aceasta să fie considerată ca „cea mai importantă dintre formele de sensibilitate” (Jenkins), fără de care ar fi imposibilă menținerea stațiunii bipede, deplasarea, vorbirea și alte importante activități motorii.

Astfel etichetată, kinestezia ar furniza în special informații privind schema mișcării și fazele ei, având ca excitanți adecvați diverși stimuli mecanici (de întindere, presiune, încordare, tracțiune), care acționează asupra sistemului artro-muscular în timpul activității locomotorii comandate și coordonate de sistemul nervos însuși.

În această situație, kinestezia poate fi considerată ca un veritabil „feed-back”, care permite informarea sistemului nervos asupra propriei sale activități (fig. 19.19).

În consecință, se poate afirma că diverse informații asupra mișcărilor active s-ar transmite prin intermediul sistemului articular proprioceptiv, receptorii musculari servind doar pentru corijarea activității tonice implicate în executarea adecvată a celor mai diverse mișcări.

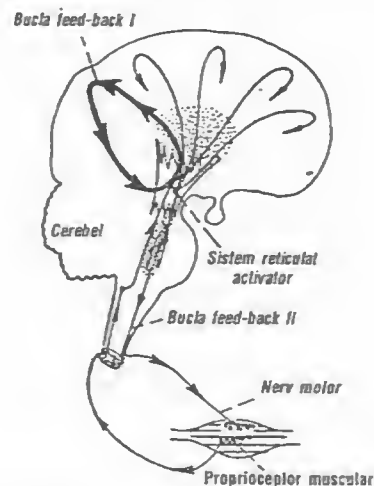


Fig. 19.19. Feed-back-ul senzorial kinestezic proprioceptiv implicat în reacțiile tonice din starea de veghe (Ganong, 1977).

Câteva particularități cu totul generale privind artrokinestia și miokinezia se impun în contextul existenței unor date, încă, controversate, în special asupra acesteia din urmă.

Kinestezia articulară. Date electro-fiziologice recente asupra receptorilor articulari sugerează ideea unor posibilități restrânse ale acestora ca surse de informare detaliată, încât, dacă kinestezia ar depinde numai de aceștia, atunci ea ar fi destul de stearsă și incompletă.

Unele cercetări electro-fiziologice (Bungers și Clark) semnalează prezența unor răspunsuri maxime la mișcările articulației femuro-tibiale de pică, iar altele lansează ideea rolului kinestezic al eferențelor fazice ca sursă a unei slabe activități de descărcare în poziția articulară medie, fapt care ar justifica existența unei oarecare activități de descărcare tonică semnalată în acest caz.

Alți cercetători (Mounicastle), pe baza unor culegeri de biopotențiale monounitare din neuronii articulari, la nivelul talamusului de maimuță, au emis ideea mecanismului de „integrare neuronală”, care ar interveni în generarea unui semn informațional util artrokinestezic pentru întreaga gamă de mișcări pluridirecționale, acesta fiind valabil în special în cazul receptorilor cu adaptare lentă, tip Golgi.

Detectarea și evaluarea mișcării angulare articulare ar fi asigurată de prezența unor receptori tonici și fazici, în special, care ar emite trenuri de descărcări fazice strict corespunzătoare unor anumite intervale unghiulare. Unghiul de „activare”, reflectând întreaga zonă deservită de receptori articulari la o frecvență maximală, este cuprins între 15–30°, cunoașterea lui având o deosebită importanță în evaluarea clinică și fiziologică a gradului și modului de mobilizare articulară.

În acest caz, pragul de percepție a mișcării, tradus în mobilizarea articulară, depinde, pe de o parte, de amplitudinea unghiulară și, pe de alta, de viteza modificării acestuia, astfel încât în mișcările pasive percepția articulațiilor proximale este mult crescută în raport cu cea a articulațiilor distale.

Kinestezia musculară. Particularitățile topografice și de intervenție ale celor două tipuri de receptori musculo-tendinoși imprimă unele deosebiri în mecanismele kinestezice ale fiecăruia din aceștia, fapt care se reflectă și în gradul lor cuplat de cooperare.

Mecanisme kinestezice fusale. (a) Întinderea pasivă: fusul neuro-muscular este situat în paralel cu fibrele extrafusale. Când mușchiul este întins pasiv, fusurile se distind de asemenea. Această extensie produce o contracție reflexă a fibrelor musculare extrafusale. Astfel, mecanismul fusul și conexiunile sale reflexe constituie un sistem de retrocontrol, care acționează pentru menținerea lungimii mușchiului; dacă acesta este întins, descărcarea fusulă crește, producându-se o scurtare reflexă a mușchiului; dimpotrivă, dacă mușchiul se scurtează, descărcarea fusulă scade și mușchiul se relaxează.

Terminaliile primare (fibrele anulo-spirale tip Ia și secundare „în buchet”) sunt ambele stimulate atunci când fusul se întinde, dar răspunsul este diferit.

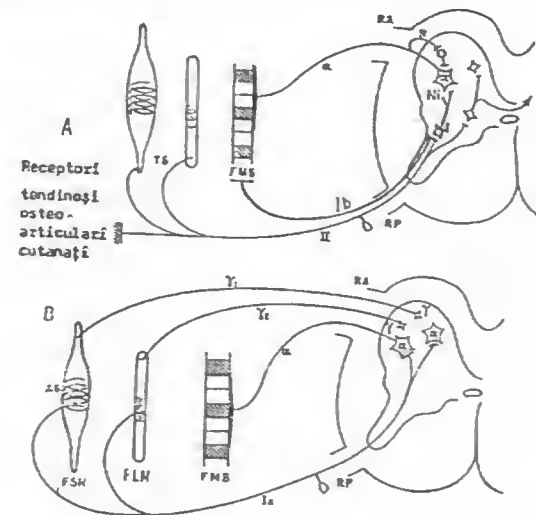


Fig. 19.20. Mecanisme kinestezice de reglare tonică. A: Mecanisme pasive secundare (II) și primare (Ib și Ia). B: Mecanisme active alfa-gamma. FMS, fibră musculară striată. RA-RP, rădăcină anterioară și posterioară. Ni, neuron intercalar. R, circuit Renshaw. FSN, fibră fusulă cu sac nuclear. FLN, fibră fusulă cu lanț nuclear.

Răspunsul primar măsoară lungimea instantanee și viteza de întindere a mușchiului, în timp ce răspunsul secundar măsoară, în esență, lungimea sa momentană.

b) Întinderea activă: funcționarea fusului este asigurată și de întinderea sa activă, prin intervenția diferențiată a fibrelor gamma, și gamma, implicate, după cum se știe, în stabilizarea posturii și a nivelului de veghe. Astfel, stimularea eferențelor gamma dinamice de la nivelul fibrelor cu sac nuclear crește sensibilitatea fusulă la viteza de întindere, în timp ce aceeași solicitare a eferențelor gamma statice ale fibrelor cu lanț nuclear mărește sensibilitatea fusulă la extensia constantă și susținută. În acest mod, apare posibilitatea ajustării separate a răspunsurilor fusoriale la stările fazice și tonice.

Dispozitivul neuro-fusul și conexiunile sale reflexe ar constitui în acest caz un sistem de retrocontrol cibernetic pentru adaptarea lungimii corespunzătoare unei activități tonice musculare optime, în care intervenția unui mecanism cuplat alfa-gamma ar juca un rol esențial (fig. 19.20).

Actualmente, se pare că un astfel de dispozitiv musculo-tendinos ar furniza informații pe care se bazează percepția poziției și mișcării unui segment de corp, însă aceasta din urmă este raportată la articulația respectivă și nu la mușchiul însuși.

Mecanisme kinestezice tendinoase. Interpuse în serie la fibrele musculare și stimulate prin întinderi pasive și contracții active ale mușchiului, organele tendinoase Golgi apar ca elemente ale unui circuit de retrocontrol. Acestea ar controla tensiunea mușchiului într-o manieră analoagă servomecanismului fusul, care reglează, din contră, lungimea acestuia (Ganong).

În asigurarea unui astfel de mecanism, transmisia medulară a informației tensionale, realizată prin intermediul afrențelor senzitive de tip Ib, este interceptată de neuroni intercalari, medulari, care snt conectați, la rândul lor, cu motoneuronii alfa ai mușchilor agoniști, inhibându-i. O astfel de interacțiune explică intervenția unui reflex miotatic invers la depășirea unei anumite limite de întindere, până la care există o proporționalitate cu contracția reflexă miotatică. Atât reacțiile de alungire, cunoscute clinic sub numele de „efect de briceag”, cât și ale clonusului, semn caracteristic stării de hiperdescărcare gamma, pot fi explicate în baza celor discutate mai sus, prin intervenția alterării ritmice a reflexului miotatic direct și invers (fig. 19.21).

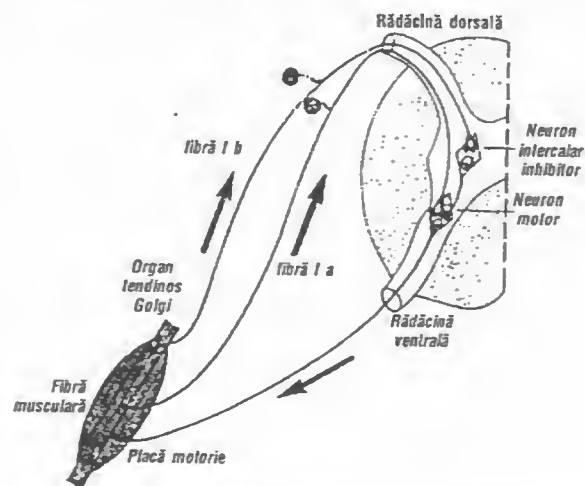


Fig. 19.21. Schema reflexelor miotice direct (la) și invers (lb) implicate în efectul de „briceag”.

19.7. ANALIZATORUL VESTIBULAR

În concepția proprie sistemelor informaționale senzitivo-senzoriale, analizatorul vestibular este constituit în esență din trei elemente:

- elementul periferic de recepționare a stimulilor specifici funcției sale, reprezentat de aparatul vestibular sau labirint;
- elementul de conducere a informației vestibulare, reprezentat de filetele nervului vestibular și alte conexiuni cortico-subcortice;
- elementul de integrare și decizie a informației, reprezentat de unele zone ale axului cerebro-spinal (trunchi cerebral, talamus, măduvă, cortex cerebral, cerebel), în care arhicerebelul ar reprezenta un veritabil creier vestibular, cu deosebite implicații în mecanismele simțului vestibular.

Pentru a contura mai pregnant locul și rolul vestibulului în cadrul sistemelor senzitivo-senzoriale, ca unul din dispozițiile implicate în activitățile de postură, echilibru și orientare a corpului în spațiu, se impun câteva date anatomo-funcționale privind elementele constitutive ale analizatorului.

19.7.1. PARTICULARITĂȚI ANATOMO-FUNCȚIONALE

Labirintul membranos. Situat într-o cavitate a stâncii temporalului, acesta este constituit din canale semicirculare și organe otolitice, fiind în strânsă legătură prin rampa timpanică a urechii interne cu organele auzului și conținând în interiorul cavităților sale lichidul endolimfatic. Cele trei canale semicirculare (lateral, anterior și posterior) sunt dispuse în trei planuri ortogonale (orizontal, frontal și sagital), extremitățile lor comunicând direct cu diverticulul membranos al utriculei, legată, la rândul ei, de o altă cavitate, denumită saculă. Fiecare canal este constituit dintr-un sac și o ampulă, în care este situată o formațiune receptoare senzitivă, denumită creastă ampulară. Aceasta conține elementele senzoriale reprezentate de celule ciliate, care sunt, la rândul lor, acoperite de o formațiune gelatinoasă, denumită cupulă.

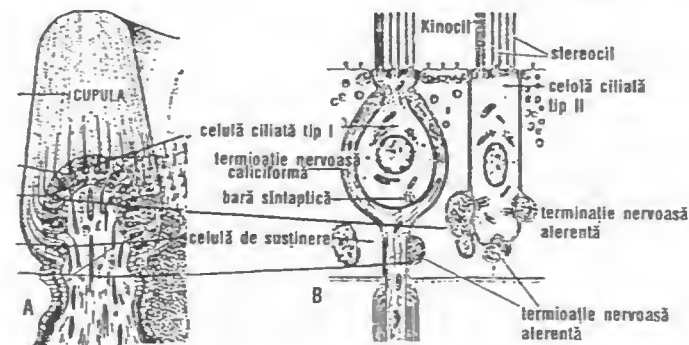


Fig. 19.22. Celule senzoriale labirintice. A: Creasta ampulară. B: Detaliu microscopic (Burgeot, 1973).

Organele otolitice. Reprezentate de utriculă și saculă, conțin o masă gelatinoasă, de care sunt fixate săruri de calciu în forma unor conglomerate, cunoscute sub denumirea de otolite, locul creșterii fiind asimilat cu cel al maculelor (fig. 19.22).

Lichidul endolimfatic. Ocupă toată cavitatea labirintului membranos, separat de cel osos prin spațiile perilimfatice, și joacă un rol deosebit în procesele de transducție vestibulară. Prin concentrația sa crescută în ioni de clor, lichidul endolimfatic nu poate fi în întregime asimilat cu lichidul endocelular, fapt consemnat și de slaba pozitivitate a acestuia în raport cu cea a lichidului perilimfatic, luat ca referință.

Celulele senzoriale. Actualmente, la nivelul labirintului sunt recunoscute două tipuri de celule senzoriale: de tip I și de tip II, care sunt în relații particulare cu terminațiile nervoase aferente și eferente. Primele au formă de recipient, cu fundul oval și sunt conectate cu terminațiile de tip I dendritice caliciforme aparținând primului neuron vestibular plasat în ganglionul Scarpa; celulele de tip II, de formă cilindrică vin prin intermediul bazei lor în relație cu terminațiile nervoase aferente butonate în formă de măciucă.

Cilii epitelului senzorial. Toate celulele senzoriale sunt prevăzute la extremitățile lor apicale cu un fascicul asimetric de cili dispuși paralel, care ar juca un rol capital în mecanismele de transducție alături de lichidul endolimfatic și otolite. Aceasta o reflectă și dispoziția lor variabilă în diverse regiuni senzoriale ale labirintului, existând o strânsă relație între orientarea fasciculelor de cili și funcția lor. Cel mai mare dintre acestea, cu dispoziție centrală, denumit kinocil, prin deplasarea lui în raport cu suprafața apicală este implicat îndeosebi în transducția statokinetică.

Cupula. Reprezintă o formațiune flexibilă, gelatinoasă, care înglobează celulele ciliate ale crestei ampulare, ocupând întreaga cavitate ampulară, la nivelul căreia se fixează formând un perete mobil, care separă ampula în două compartimente, încât orice mișcare a endolimfei determină o deplasare a acesteia și, în consecință, o mobilizare a cililor. La nivelul utriculei și saculei, mobilizarea cililor este realizată prin deplasarea otolitelor (echivalente cupulei), care sunt dispersate în lichidul endolimfatic.

19.7.2. CĂILE DE TRANSMISIE ȘI INTEGRARE VESTIBULARĂ

Receptorii ciliați de la nivelul creștelor ampulare, cât și cei de la nivelul maculei utriculare și saculare, sunt în conexiune cu fibrele aferente ale nervului vestibular, ai cărui pericarioni sunt situați în ganglionul Scarpa.

Fibrele axonale ale nervului vestibular se distribuie la nivelul nucleilor vestibulari bulbo-protuberanțiali ai trunchiului cerebral; câteva fibre vestibulare contactează direct lobul floculo-nodular al cerebelului.

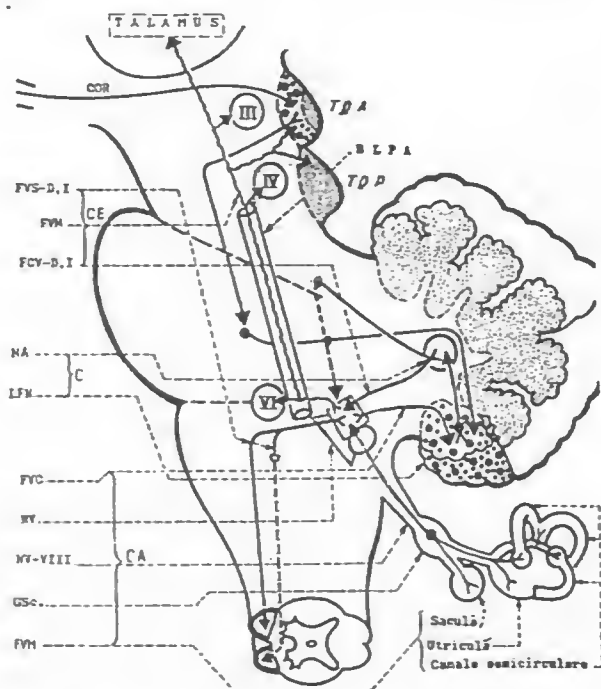


Fig. 19.23. Căile transmisiei vestibulare. CA, căi aferente. COR, căi optice reflexe. FVC, fascicul vestibular. GSc, ganglion Scarpa. NA, nucleii acoperişului. LFN, lob floco-nodular. TQA-TQP, tuberculi cvadrigemeni anteriori și posteriori. BLPA, bandeletă longitudinală posteroară de asociație. III, nerv oculomotor comun. IV, nerv patelar. VI, nerv oculomotor extern. CE, căi eferente. FVS-D, I, fascicul vestibulo-spinal direct și încrucișat. FVM, fascicul vestibulo-mezencefalic. FCV-D, I, fascicul cerebello-vestibular direct și încrucișat (Bouret & Louis, 1971).

De la acești nuclei, care reprezintă o veritabilă placă turnantă a căilor vestibulare, vor pleca legături cu: paleocerebelul de ambele părți; direct și prin intermediul cerebelului la nucleul roșu și la nucleii formațiunii reticulată a trunchiului cerebral; tuberculi cvadrigemeni și talamus, luând, în același timp, contactul și cu nucleii nervilor oculomotori; cu măduva, prin fasciculele vestibulo-spinale (fig. 19.23).

Multitudinea căilor de transmisie și a centrilor nervoși implicați în funcționarea analizatorului vestibular explică dificultățile atât în explorarea și diagnosticul diverselor sindroame vestibulare, cât și în explorarea mecanismelor sale de recepționare și transmitere a informației.

Mecanisme informaționale vestibulare. Atașat cerebelului vestibular, întreg sistemul labirintic este antrenat în reglarea tonusului postural, în vederea echilibrării corpului în strânsă legătură cu schimbarea poziției în spațiu și a modificărilor care le produc vectorii gravitaționali.

În acest sens, sistemul labirintic stă la baza originii reflexelor labirintice compensatoare din timpul deplasărilor, încât intervenția cuplată atât a canalelor semicirculare, cât și a organelor otolitice presupune o coordonare perfectă prin intermediul unor mecanisme, care nu sunt atât de bine cunoscute.

Legat de aceste implicații, sunt necesare câteva precizări separate privind funcționarea canalelor semicirculare și a organelor otolitice, marcând locul lor în ansamblul mecanismelor senzitive vestibulare.

Canalele semicirculare. Mobilizarea lichidului endolimfatic în timpul unei accelerații angulare (rotatorii) în planul unui canal semicircular determină o stimulare a crestei respective, prin deplasări ale cupulei. Aceasta deviază foarte rapid fie spre utriculă, fie spre canal, în sensul mișcării lichidului, în timp ce revenirea sa spre poziția de repaus (la decelerare) este foarte lentă, justificând durata lungă a răspunsurilor vestibulare. Rotația de stimulare poate fi făcută în două sensuri, fie în raport cu ampula, prin deplasări ale lichidului în sens ampulofug sau ampulipet, fie în raport cu mișcările capului în ansamblu, prin rotirea lui în sens orar sau antiorar. În acest caz, mișcările lichidului și ale pereților sunt în sensuri contrare în timpul fazei de accelerare și decelerare, iar, în plină rotație cu viteză constantă, lichidul și pereții se deplasează consensual și cu aceeași viteză.

Informațiile privind mișcările de rotație ale lichidului endolimfatic sub forma unor variații de frecvență ale activității electrice spontane sunt obținute doar în timpul accelerației sau decelerării angulare. Astfel, frecvența descărcărilor spontane de repaus crește în cursul unei mișcări endolimfatice ampulopete, evidențiind o stare de excitație, în timp ce mișcarea ampulofugă determină, din contră, o scădere a frecvenței descărcărilor spontane, caracteristică stării de inhibiție, în cazul canalului semicircular orizontal; pentru canalul semicircular vertical, răspunsurile, din contră, sunt inverse, cu excitarea receptorilor la mișcarea ampulofugă și inhibarea lor la cea ampulopetă.

Comportarea receptorilor vestibulari în sensul descris explică, de altfel, posibilitatea obținerii unor informații foarte precise privind proiecția corpului în stare de repaus sau de mișcare în raport cu coordonatele spațiului.

Datorită variațiilor coerente ale activității spontane electrice de ambele părți, cu o creștere a acestora de o parte și o scădere concomitentă de partea opusă, centrii sunt informați asupra mișcărilor și sensului de rotație sau deplasare a capului.

Acțiunile căilor vestibulare asupra anumitor centri nervoși și, în particular, a celor responsabili pentru mișcarea membrelor și globilor oculari pot determina o serie de reacții din partea mușchilor ochilor, cefei, a membrelor și deplasări ale globilor oculari.

Ca regulă generală, impulsurile nervase care provin de la un labirint tind să producă excitație, determinând o deviație lentă a membrelor și ochilor spre partea opusă. Deviațiile membrelor persistă pe toată durata stimulării labirintului, în timp ce ale globilor oculari sunt interceptate prin secuse rapide ale acestora spre poziția lor inițială.

Ansamblul de mișcări alternative ale ochilor, cu o fază de refixare rapidă intercalată cu o fază de fixare lentă, este cunoscut sub numele de „nistagmus”. Nistagmusul dispare la continuarea rotației cu viteză constantă și reapeare în sens invers, la oprirea bruscă a acesteia (decelare). Ca remarcă, în acest caz ar fi de reținut atât consensualitatea deviației rapide cu rotația în nistagmusul rotator, astfel că acesta „bate” pe partea stimulată, cât și direcția inversă a secuselor în raport cu sensul mișcării în cazul nistagmusului posterior.

În funcție de canalele semicirculare sau de gruparea acestora în cadrul stimulării, nistagmusul poate fi orizontal, vertical sau rotator.

Date fiind relațiile complexe ale căilor vestibulare cu diverși centri (cerebel, nucleii subcorticali, formațiune reticulată etc.), studiul „fiziologiei” nistagmusului se complică foarte mult; un rol important joacă la nivelul circuitelor neuronale prezența unor neuroni intercalari inhibitori, alături de existența unor mecanisme locale vestibulare (prezența unor fibre eferente) sau de la nivelul efecturilor musculaturii globulare (aparatură Golgi, buclă gamma etc.).

Cu toate dificultățile de interpretare, nistagmusul prezintă un deosebit interes privind obiectivarea activității labirintice, întrucât cel provocat prin rotație sau prin introducerea de apă rece în ureche face dovada unui veritabil test vestibular.

Vestibulul (organele otolitice). Formațiunile senzoriale maculare de la nivelul saculei și utriculei, ca receptori de întindere, sunt stimulate eficace prin accelerații rectilinii, ceea ce explică influența vectorilor gravitaționali asupra cupulei, otolitelor și cililor, prin efectele tracționale pe care aceștia le exercită. Strict legate de topografia lor anatomică, saculele sunt stimulate prin înclinarea laterală a capului, în timp ce utriculele sunt excitate, din contră, de înclinările anterioare sau posterioare ale acestuia.

Spre deosebire de informațiile ampulare ale canalelor semicirculare emise doar în momentul inițierii și opririi mișcării, cele provenite din organele otolitice sunt furnizate atât în cursul deplasării capului, cât și pe toată durata menținerii poziției.

Senzația mișcării este provocată prin modificarea frecvenței descărcărilor influxurilor nervoase, în sensul creșterii ei la excitare și scăderii acesteia la inhibiție, în repaus activitatea electrică spontană a fibrelor nervoase din ambele vestibule devenind stabilă.

Stimulul cel mai eficace care determină un ritm maxim de impulsuri în fibra nervoasă este cel care provoacă o depărtare a otolitelor de maculă; în timp ce apropierea (căderea) lor de maculă (direcția vectorului gravitațional în poziție normală) este însoțită, din contră, de o activitate minimală spontană.

Particularitățile consemnate privind modularea în frecvență a informației vestibulare, legată de variațiile poziționale și de vitezele de deplasare a capului, reflectă rolul deosebit de important al analizatorului vestibular în coordonarea activității posturale și de echilibru. În acest sens, aparatul vestibular oferă informații adecvate care permit, pe de o parte, o adaptare reflexă a poziției trunchiului și membrilor față de cea a capului și, pe de altă, menținerea atitudinii normale a capului și corpului cu ajutorul reflexelor de redresare statice și statokinetice, cu rol deosebit în stațiunea bipedă, echilibru și orientare a organismului față de coordonatele spațiale ale mediului său de viață.

19.8. ANALIZATORUL ACUSTIC

Rolul fiziologic al analizatorului acustic este acela de captare a undelor sonore din mediul ambiant, de a le recepționa și codifica în impulsuri nervoase, care, ajunse la scoarța cerebrală, vor crea senzația auditivă. În timp ce la animal senzația auditivă este legată de orientarea în spațiu, de semnalizarea hranei sau a pericolelor, la om senzația auditivă are o deosebită importanță pentru apariția limbajului articulat.

Analizatorul acustic ne informează asupra calităților sunetului (înălțime, intensitate, tonalitate), asupra direcției din care se propagă sau asupra distanței dintre subiect și sursa sonoră. Împreună cu analizatorii vestibular, vizual și cutanat, analizatorul acustic ia parte la menținerea echilibrului, la păstrarea poziției corpului și capului în spațiu.

Excitantul fiziologic al analizatorului auditiv este sunetul. Sunetele sunt vibrații ondulatorii transmise printr-un mediu elastic (aer) până la ureche, care le captează, le recepționează, le codifică în impuls nervos și le conduce spre cortexul auditiv – locul de formare a senzațiilor auditive.

Excitațiile sonore, pentru a putea fi percepute, trebuie să aibă o frecvență cuprinsă între 16–20 000 Hz și o intensitate de 1 decibel. Totalitatea sunetelor capabile să producă senzația de auz poartă numele de câmp auditiv, ale cărui limite se reduc după vârsta de 30–40 de ani.

Analizatorul auditiv este astfel construit, încât cuprinde o primă parte ce asigură transmiterea mecanică a vibrațiilor sonore în urechea externă, în urechea medie și mai puțin în cea internă. A doua parte a analizatorului este reprezentată de dispozitivul neuro-senzorial ce asigură transformarea mesajului sonor (mecanic) în potențial bioelectric. Ca la orice analizator, și aici întâlnim segmentul intermediar sau de conducere, constituit din nucleii și fibre nervoase ce asigură transmiterea impulsului sonor până la zona centrală corticală – corespunzătoare primei circumvoluțiuni temporale

19.8.1. SISTEMUL DE CAPTARE ȘI TRANSMISIE

Sistemul de captare și transmisie include pavilionul urechii, conductul auditiv extern, timpanul, lanțul de oscioare, membrana ferestrei ovale, perilimfa.

Pavilionul urechii captează undele sonore, dirijându-le spre conductul auditiv extern și, de aici, spre timpan. Prin reflex auditiv-cefalogic, omul și animalul își orientează capul spre sursa sonoră, captând mai bine vibrațiile. Sunetele captate de către pavilion ajung în conductul auditiv extern – tubul fonic, care nu absoarbe undele sonore, ci le reflectă și le amplifică ușor, focalizându-le.

Timpanul este primul obstacol în calea undelor sonore, are o consistență elastică și funcționează ca membrana unui microfon sub presiune, încât integritatea sa anatomică constituie o condiție importantă pentru rolul său în transmisie. Timpanul are proprietatea de a vibra la orice fel de frecvență, adică este periodic. Această calitate a timpanului opusă rezonanței face ca orice undă să-l pună în vibrație, iar încetarea bruscă a sunetului să-l oprească vibrarea. Iată de ce perforațiile membranei timpanice afectează transmiterea sunetelor spre urechea medie și, de aici, spre cea internă. Timpanul va avea o vibrație perfectă atunci când se egalizează presiunea atmosferică pe cele două fețe ale sale, ceea ce se datorește comunicării urechii medii cu cavitățile mastoidiene dar și cu faringele, prin trompa lui Eustachio, în special în momentul deglutiției.

Oscilațiile timpanului produc undă mecanică sonoră care va fi preluată de lanțul de oscioare din urechea medie. Preluată de ciocan, unda ajunge apoi la nicovală și, de aici, la scăriță, ca apoi membrana ferestrei ovale să vibreze și să transmită perilimfei unde mecanice auditive. În funcție de intensitatea undei mecanice, ciocanul și scărița, prin mușchii ce le realizează mobilizarea, vor amplifica sau vor reduce intensitatea undei, deci urechea medie are funcția de a se acomoda față de intensitățile externe. Dacă excitantul auditiv depășește 80 dB, nucleii acustici bulbari conectează nucleul facialului, care va realiza pe cale reflexă contracția mușchiului scăriței. Prin acest proces se protejează receptorul auditiv, blocându-se lanțul de oscioare și reducând intensitatea sunetului. Acest răspuns reflex de contracție a mușchiului scăriței, ca și a mușchiului tensor al timpanului se realizează după o latență de 40 ms. Dacă mușchiul scăriței este hipoton sau dacă se secționează experimental la animalul expus în ambianță cu zgomote prea puternice, animalul va surzi.

Suprafața timpanului este de aproximativ 5,5 mm², iar a ferestrei ovale de 3,2 mm². Raportul dintre suprafața membranei timpanice și a ferestrei ovale este de 13/1, încât vibrația timpanului și mobilizarea basculantă a oscioarelor vor produce o presiune de 22 de ori mai mare la nivelul membranei ferestrei ovale și, deci, a lichidului din cohlee, față de fereastra timpanică. Dacă se limitează mișcările oscioarelor prin apariția aderențelor fibroase între ele, în cursul anumitor afecțiuni inflamatorii ale urechii medii, sau dacă apare sclerozarea membranei ferestrei ovale, se vor semnala alterări semnificative ale auzului. Aceeași reducere a acuității acustice poate apărea dacă lipsește timpanul sau lanțul de oscioare, când unda vibratorie se poate transmite direct prin aerul din urechea medie la membrana ferestrei ovale.

Toate formațiunile anatomice enumerate vor adapta amplitudinea stimulului sonor pentru o captare cât mai bună la nivelul receptorului din urechea internă. Transmiterea vibrațiilor sonore se poate realiza pe calea aerică descrisă, sau pe cale directă, prin intermediul oaselor cutiei craniene. În cazul transmisiei aerice, timpanul transformă vibrația sonoră în undă mecanică, a cărei intensitate o va modula lanțul de oscioare și apoi o va trimite prin fereastra ovală către urechea internă.

În transmiterea osoasă, mai puțin fidelă pentru calitățile sunetului, este absolut necesar contactul sursei sonore cu oasele craniului, în special cu mastoida sau osul frontal.

19.8.2. SISTEMUL DE TRADUCERE

Sistemul de traducere este reprezentat de urechea internă, care conține atât aparatul acustic, cât și cel vestibular.

Aparatul acustic este reprezentat de cohlee sau melc. Cohleea este un tub conic, cu originea în vestibul, răscuit în jurul columelei de două ori și jumătate. Prezența la nivelul său a lamei osoase, a membranei bazilare și a membranei Reissner împarte cohleea în trei compartimente distincte:

- rampa vestibulară, ce comunică cu vestibulul;
- rampa timpanică, ce comunică cu urechea medie prin fereastra rotundă;
- rampa cohleară sau medie, prezentă între primele două și melcul osos.

Rampa vestibulară și cea medie sunt separate prin membrana vestibulară Reissner, iar rampa timpanului de cea medie prin membrana bazilară (fig. 19.24).

Rampa timpanică comunică cu cea vestibulară prin helicotrează, orificiu aflat la vârful melcului, ambele conținând un lichid asemănător la compoziție cu cel extracelular (bogată în Na⁺), în timp ce rampa medie conține un lichid asemănător lichidului intracelular (bogată în K⁺).

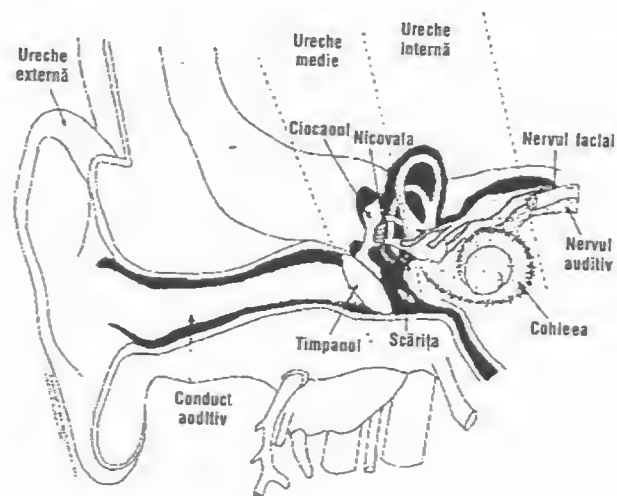


Fig. 19.24. Structura cochleei.

Vibrația sonoră ajunge în rampa vestibulară prin fereastra ovală și, de aici, se propagă în rampa medie, crescând ușor presiunea lichidului și producând bombarea membranei ferestrei rotunde. Dacă mișcările scăriței sunt foarte slabe, lichidul din rampa vestibulară este împins prin helicotrema în cea timpanică, producând din nou o bombare către în afară a ferestrei rotunde.

În acest fel va avea loc și vibrația diferențiată a membranei bazilare în funcție de frecvența sunetului. Pentru frecvențele înalte, membrana bazilară va vibra la bază, iar pentru cele joase, la vârf. Frecvențele intermediare activează membrana bazilară între cele două extremități.

Celulele receptoare aflate pe această membrană vor fi și ele stimulate diferențiat, generând diverse impulsuri nervoase ce se vor transmite spre cortex.

Organul Corti reprezintă adevăratul organ receptor auditiv care transformă vibrațiile membranei bazilare în influx nervos. Se află dispus pe membrana bazilară în toată lungimea melcului și este format din celule receptoare și din celule de susținere cu diferite forme.

Celulele receptoare sunt aranjate într-un strat intern și altul extern, primul conținând doar un singur rând de celule, iar cel de-al doilea, 3-4 rânduri.

Celulele stratului intern se găsesc în număr de aproape 3 500, având un diametru de 12 μm , iar cele externe, în număr aproximativ de 20 000, cu diametru doar de 8 μm . În partea apicală, celulele receptoare auditive prezintă cili, care vin în contact pe toată lungimea organului Corti cu membrana tectoria, ce se prezintă ca o masă rigidă, gelatinoasă, în care se inclavează acești cili.

Celulele receptoare din organul Corti sunt mecanoreceptori ciliați, care vor transmite potențialul receptor dendritelor celulelor din ganglionul Corti, aranjate în spirală, la baza celulelor receptoare. Aceste dendrituri transformă potențialul receptor în potențial generator, ce se va propaga pe calea segmentului intermediar auditiv, până la zona centrală a cortexului temporal (fig. 19.25), în vederea formării senzației de auz.

Ramurile nervoase ce constituie nervul auditiv au și ele o organizare spațială, încât fibrele dintr-o anumită zonă a membranei bazilare ajung într-o anumită zonă a nucleilor cohleari din trunchi.

Înregistrând semnalele electrice din tracturile auditive și din receptorii auditivi de pe cortex, s-a putut observa că anumite frecvențe sonore activează anumiți neuroni corticali.

Frecvențele joase sunt, probabil, mai bine discriminate, pentru că distrugerea jumătății apicale a cohleei, unde se află membrana bazilară, impresionată de frecvențe joase, va duce la detectarea normală a sunetelor, dar frecvențele joase vor fi mult mai puțin deosebite de cele înalte. Când amplitudinea vibrațiilor membranei bazilare este mai mare, celulele receptoare auditive vor fi mai puternic activate și vor produce excitații cu ritm mai crescut în terminațiile dendritice de la baza lor, după cum poate să apară și sumarea spațială a impulsurilor. Când membrana bazilară bombează spre rampa vestibulară, celulele auditive se deplasează și numărul potențialelor de acțiune din nervii acustici va crește.

Când membrana bazilară are mișcare inversă, celulele receptoare sunt hiperpolarizate și, ca urmare, se reduc potențialele de acțiune din fibrele acustice.

Rampa medie conține endolimfă, spre deosebire de cea vestibulară și de cea timpanică, care conțin perilimfă și care comunică cu spațiul subarahnoidian al creierului în special la copiii mici, încât perilimfa are compoziția identică cu a lichidului cefalorahidian.

Endolimfa este total deosebită de perilimfă, fiind (probabil) secretată de stria vascularis, aparținând pereților rampei medii. Endolimfa conține mari cantități de K^+ și foarte puțin Na^+ , exact invers ca perilimfa. Între endolimfă și perilimfă există permanent un potențial electric de 80 mV, cu pozitivitatea în interiorul rampei medii și cu negativitatea în afara ei. Este vorba de potențialul endocohlear menținut prin secreția permanentă în endolimfă a K^+ de către stria vascularis.

19.8.3. SISTEMUL DE CONDUCERE

Celulele receptoare auditive vor transmite diferențiat impulsul auditiv, după cum sunt aranjate în stratul intern sau în cel extern. Cele interne transmit separat impulsul către o fibră senzitivă, iar cele externe, în ansamblu, sunt conectate cu o fibră senzitivă, încât se explică de ce majoritatea fibrelor nervului acustic primesc informații în special de la celulele receptoare interne.

Neuronii ganglionului Corti, constituind protoneuronul căii acustice, sunt bipolari, dendritile lor înconjurând celulele receptoare din organul Corti, iar axonii, prin unire, formează ramura acustică a perechii a VIII-a de nervi cranieni. Pe această cale, mesajul sonor ajunge la deutoneuronul căii acustice, reprezentat de nucleul cohlear ventral bulbar, de unde vor pleca fibre în două direcții:

- unele fibre formează corpul trapezoid și vor ajunge în oliva pontină homolaterală (1/3 din fibre) și la cea heterolaterală (2/3 din fibre). O parte din aceste fibre, fără sinapsă, pătrund în lemniscul lateral, urcând spre corpul geniculat median din metatalamus, dar trimițând și colaterale de releu spre tuberculii cvadrigeni inferiori. Corpul geniculat median reprezintă al treilea neuron al căii acustice, după care fibrele se proiectează în prima circumvoluție temporală;

- alte fibre, după sinapsă în nucleul acustic ventral, ajung în cel dorsal, după care, sub numele de strii acustice, vor urca homolateral, făcând releu cu diferiți nuclei ai formațiunii reticulate mezencefalo-diencefalice (contribuind, astfel, și la procesul de trezire corticală) sau, cu fibrele descendente ale formațiunii reticulate, ajung la motoneuronii medulari.

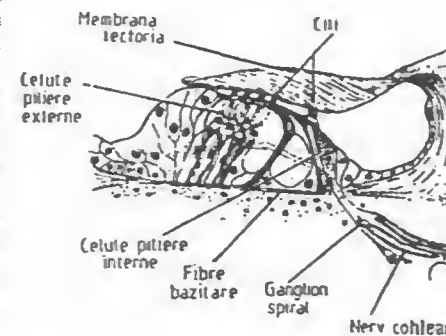


Fig. 19.25. Organul Corti.

De la calea acustică pornesc colaterale și spre cerebel, fie direct din nucleii auditivi, din coliculi cvadrigemeni inferiori, de la substanța reticulată a trunchiului sau chiar de la cortexul auditiv, încât, în cazul unui zgomot neprevăzut, brusc, se poate activa și vermisul cerebelos. În funcție de frecvența sunetului, se vor activa diverse zone ale nucleilor cohleari. Astfel, în nucleul cohlear dorsal, frecvențele înalte sunt reprezentate pe linia mediană, iar cele joase în părțile laterale, orientare spațială care se întâlnește și în cortexul auditiv. În drumul lor spre cortex, fibrele căii acustice trimit colaterale și nucleilor nervilor cranieni VI și VII.

19.8.4. SEGMENTUL CENTRAL

Proiectarea căilor auditive se face în special în cortexul temporal – girusul temporal superior, mai puțin în cortexul insular și chiar în părțile laterale ale operculului parietal, încât cortexul auditiv este reprezentat de ariile 41, 42 și 22 Brodmann (fig. 19.26).

Aria auditivă primară este excitată direct prin proiecțiile din corpul geniculat median, iar ariile auditive de asociație primesc impulsul de la ariile primare și de la proiecțiile talamice – corpul geniculat median.

Aria temporală superioară răspunde diferențiat la frecvențele sonore. S-a putut observa la maimuță că zona posterioară a girusului temporal superior răspunde la frecvențe înalte, în timp ce zona sa anterioară răspunde la frecvențe joase.

Neuronii cortexului auditiv de asociație nu răspund la toate frecvențele sonore, ele având posibilitatea să aprecieze frecvența sunetelor cu informațiile din alte zone senzoriale corticale; aria auditivă de asociație din lobul parietal asociază informația auditivă cu cea somestezică.

Dacă se distruge complet și bilateral cortexul auditiv, animalul detectează sunetele și are o reacție la acestea, dar nu mai poate discrimina înălțimea, frecvența și natura lor. Cortexul auditiv are, de asemenea, un rol deosebit în diferențierea tonală a sunetelor.

Dacă la om se distruge ariile de asociație auditive, în timp ce aria primară se păstrează, va exista posibilitatea diferențierii tonalității sunetului și se vor interpreta simplist calitățile acestuia, dar nu se va putea înțelege semnificația sunetului, cum ar fi semnificația cuvântului rostit.

Distrugearea bilaterală a cortexului auditiv nu permite aprecierea direcției din care vine sunetul. Direcția sunetului se poate aprecia datorită diferenței de timp cu care ajunge sunetul la o ureche față de cealaltă, cât și a diferenței de intensitate a sunetului în cele două urechi aflate la distanță inegală de sursa sonoră. Mișcările de rotație a capului ajută, de asemenea, la analiza vizuală spațială și la verificarea direcției din care vine sunetul.

În momentul în care un sunet parcurge conductul auditiv extern și ajunge la elementele receptoare din urechea internă, va realiza un potențial de acțiune ce se va transmite neuronilor din zona mediană a nucleului olivar superior controlateral, dar, în același timp, va inhiba pentru foarte puțin timp și neuronii nucleului olivar superior ipsilateral (fracțiuni de milisecunde).

Detectarea direcției sunetului se realizează la nivelul nucleilor olivari superiori, dar se perfectează în cortexul auditiv, care va „indica” direcția sunetului în funcție de zona care este excitată maximal.

Scoarța cerebrală auditivă trimite eferențe spre cohlee, trecând prin nucleul olivar superior până la organul Corti (fibre retrograde). Aceste fibre cortico-cochleare sunt inhibitoare. Stimularea directă a

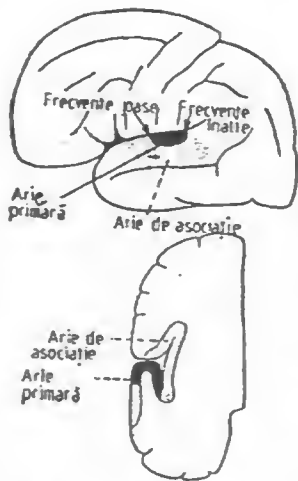


Fig. 19.26. Proiecția corticală a sensibilității auditive.

unor puncte din nucleii olivari va inhiba arii corespunzătoare ale organului Corti, reducându-i sensibilitatea cu 15–20 dB. Subiectul își poate îndrepta atenția spre un sunet cu o anumită calitate acustică, în timp ce le respinge pe cele cu o altă calitate; este exemplul unui instrumentist care face parte dintr-o orchestră simfonică și care rămâne atent doar la anumite sunete muzicale, iar pe altele nici nu le aude.

19.8.5. CARACTERISTICILE EXCITANTULUI SONOR

Pentru ca urechea omului să deosebească sunetele între ele, apreciază intensitatea, timbrul și tonalitatea lor. Cu cât amplitudinea vibrațiilor este mai mare, cu atât intensitatea sunetului crește. Intensitatea sunetului (presiunea sonoră) depinde și de mediul prin care acesta se transmite. Astfel, viteza de transmitere a sunetelor prin aer este de 340 m/s, în timp ce mediile mai dense (medii lichide, solide) transmit sunetul cu o viteză mult mai mare. Undele sonore se propagă longitudinal și pot fi reflectate când întâlnesc un mediu extrem de dens, realizând ecoul.

Tonul sunetelor reprezintă numărul de vibrații pe secundă, exprimându-se în cicli/s sau în Hz. Tonul definește și înălțimea sunetului.

Timbrul caracterizează totalul armonicilor supraadăugate sunetului de fond, permițând deosebirea între două sunete de aceeași tonalitate și intensitate. Permite aprecierea materialului din care este confecționat obiectul emițător, făcându-se deosebirea ca nuanță a două sau mai multe sunete emise de instrumente diferite, cu aceeași tonalitate și intensitate. Un sunet, din punct de vedere al timbrului, poate fi grav sau înalt, după cum armonicile sunt în număr mai mare sau mai mic.

Pragul audicienței: valoarea cea mai mică a intensității unui sunet care se percepe de către ureche poartă numele de prag de audiciență, sau prag sonor. Acesta variază în funcție de capacitatea individuală de percepție și de antrenamentul persoanei respective. Urechea umană percepe cel mai bine sunetele a căror tonalitate este cuprinsă între 1 024–4 096 Hz, cu sensibilitate maximă pentru sunetul cu frecvența de 2 048 Hz. Cu cât intensitatea sunetului crește, cu atât sunetul se va percepe mai intens. Domeniul vorbirii cuprinde sunete între 2 000–4 000 Hz. Percepția nivelului de intensitate (presiune sonoră) se exprimă, din punct de vedere cantitativ, în „foni” sau „soni”. Pentru o persoană adultă cu auzul bun, pragul auditiv mediu se situează la 4 foni. Dacă va crește prea mult intensitatea unui sunet, apare senzația de durere, corespunzătoare la 130 de foni.

Sunetele prea intense pot produce la nivelul analizatorului auditiv serioase leziuni, care pot duce, în ultimă instanță, la pierderea auzului (surditate). Dacă locul de muncă impune totuși un mediu cu sunete prea intense, se vor folosi antifoane, pentru a proteja urechea.

Frecvența este un parametru important al sunetului. Adultul sănătos percepe frecvențe între 16–20 000 Hz, cele superioare acestor valori reprezentând ultrasunetele, iar cele sub 16 Hz – infrasunetele. Ambele categorii nu sunt percepute de urechea umană. Persoanele în vârstă au câmpul auditiv mai redus, percepend sunete cuprinse doar între 50–8 000 Hz.

Pragul auzului se determină corect prin audiometrie, folosind audiometre radioelectrice. Percepția frecvenței unor sunete se bazează pe date subiective, persoanele investigate recunoscând frecvențe variabile exprimate în Hz, omul și animalele superioare putând percepe și o diferență de frecvență de 0,3 Hz. Bolnavii surzi au pragul de auz ridicat, adică pentru a auzi au nevoie de o intensitate sonoră mai ridicată, comparativ cu persoana ce aude normal (fig. 19.27).

Din punct de vedere al intensității sunetului, trebuie urmărit doi parametri, și anume: pragul auditiv și pragul senzației.

Pragul auditiv este intensitatea minimă a unui sunet pentru a produce senzația de auz. Cel mai slab sunet perceput de urechea umană este dat de o vibrație de presiune de aproximativ 1/20 000 barii (barie – unitate de presiune egală cu o milionime de atmosferă sau cu o dină/cm² sau cu o forță de 1/12 000 dine/cm²).

Acest sunet ar fi de aproximativ 3 000 cicli/s. Pragul auditiv variază în funcție de frecvența vibrației, crescând pe măsură ce frecvența undelor sonore se apropie de limita inferioară (10 Hz) și de cea superioară (20 000 Hz). Deci, ca un sunet să poată fi perceput, trebuie să aibă o intensitate de 100 de barii pentru frecvența maximă de 20 000 Hz.

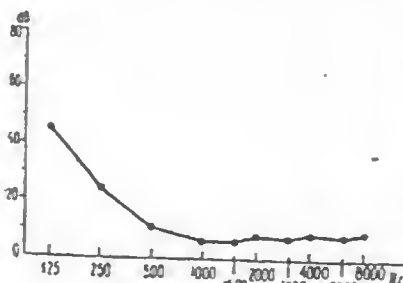


Fig. 19.27. Audiograma normală.

tactilă sau de presiune. În acest fel, frecvențele joase sunt mai mult simțite decât auzite, pentru că sunt percepute și de către receptorii de presiune și de către organul Corti. Pragul maxim al senzației este cuprins între 250–1 000 Hz și cel minim spre 20 000 Hz.

19.8.6. ROLUL URECHII MEDII

Datorită prezenței timpanului și a oscioarelor, ce realizează un ansamblu mecanic complex, urechea medie are posibilitatea să nu modifice frecvența și sensul sunetului, nepermițând pierderea energiei undelor sonore. Datorită sistemului timpan-oscioare, se realizează modificarea energiei sonore incidente prin fenomene mecanice, la nivelul lanțului oscular, în sensul diminuării sau amplificării sale, cu participarea contracției mușchilor scăriței sau ciocănașului. Mușchiul ciocanului este tensor al timpanului, prezentând o sensibilitate deosebită la oscilațiile acestuia. Vibrația membranei timpanice realizează excitarea receptorilor fusali ai mușchiului ciocănașului care, pe cale reflexă trigeminală, vor limita oscilația membranei timpanice. Mușchiul scăriței, innervat de facial, limitează deplasarea acesteia.

Când excitația sonoră este prea intensă pentru urechea internă, prin nervul acustic se transmit influxuri excitatoare către punte pentru nucleul facialului, care va realiza, prin contracția mușchiului scăriței, diminuarea intensității sonore. Acest reflex se declanșează atunci când sunetul depășește 80 dB, constituind un mijloc de protecție a urechii interne și a formațiunilor auditive centrale. Raportul dintre suprafața activă a timpanului și cea a ferestrei rotunde este foarte mare (17/1), încât și amplificarea sonoră este explicabilă.

19.8.7. ROLUL URECHII INTERNE

Energia sonoră preluată de scăriță este transmisă, prin intermediul ferestrei ovale, perilimfei din rampa vestibulară. Lichidele fiind incompresibile, deviația scăriței spre urechea internă, în mișcarea sa de dute-vino, produce bombarea membranei ferestrei rotunde în sens invers, deoarece, prin helicotrează, vibrația va fi apoi transmisă și perilimfei din rampa timpanică. S-a observat, de asemenea, că unda sonoră se amplifică progresiv, pe măsură ce se îndepărtează de fereastra ovală.

Pentru sunetele înalte, unda sonoră va avea amplitudinea maximă în regiunea bazei melcului membranos, iar pentru sunetele joase, în zona vârfului acestuia.

Undele sonore ajunse în perilimfă vor pune în vibrație membrana bazilară, iar ciliile celulelor senzoriale auditive vor suferi comprimări sau întinderi, în funcție de amplitudinea și frecvența undelor sonore

În practică, măsurarea intensității sunetelor se realizează cu ajutorul unei unități numite bel — după numele inventatorului telefonului, Graham Bell. A 10-a parte din bel se numește decibel (dB). Belul este o valoare arbitrară, reprezentând logaritmul raportului dintre intensitatea sunetului studiat și cea a unui sunet standard. Intensitatea standard o alege exploratorul, fiind cea mai mică intensitate a unui sunet perceput într-o cameră perfect izolată fonic.

Pragul auditiv măsurat în decibeli este zero, știind că urechea omului percepe sunete cu intensitatea între 0 și 140 dB. Vocea șoptită are 20 dB, în conversație 80 dB, iar zgomotul unui motor de avion are intensitatea de 120 dB. Sunetele ce au intensitatea peste 140 dB alterează organul Corti.

Pragul senzației reprezintă intensitatea sunetului la care senzația auditivă este înlocuită printr-o senzație

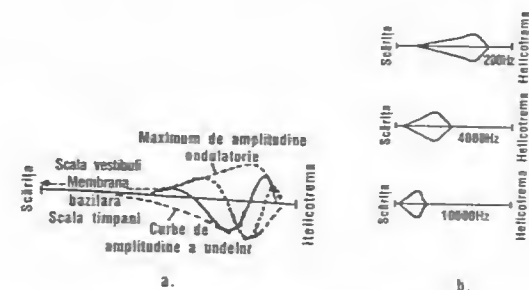


Fig. 19.28. a: Vibrarea maximă a membranei bazilare la diferite frecvențe sonore; b: Progresia unei sonore în canalul endolimfatic.

propagate prin perilimfă. În cazul ajungerii succesive a sunetelor în urechea medie, scărița, fiind solicitată permanent, va favoriza apariția unei serii de unde ce va pune în vibrație întreg tubul endolimfatic (rampa vestibulară, rampa medie, rampa timpanică). Aceste unde care apar se numesc „unde migratoare”. Rigiditatea membranei bazilare scade de la bază către helicotrează, fiind și mai lată spre vârful melcului membranos, încât amplitudinea oscilațiilor în această zonă este mai mare decât la bază. Spre vârful melcului, unda de propagare va avea un maximum ondulatoriu, ce se va manifesta în diverse puncte ale membranei bazilare, în funcție de frecvența sunetului (sonorizarea cu frecvență joasă va avea un maximum ondulator spre vârful nucleului) (fig. 19.28).

Celulele senzoriale vor fi excitate în zona de maximum ondulatoriu a membranei bazilare, încât se înțelege de ce fiecare frecvență va excita alte celule senzoriale.

19.8.8. ROLUL SISTEMULUI DE CONDUCERE

Procesul prin care energia fizică, reprezentată prin undele sonore, este transformată în influx nervos de către dendritele neuronilor ce alcătuiesc organul Corti, este mai puțin cunoscut.

Variațiile de potențial electric care iau naștere în nervul cohlear în timpul stimulării receptorului de către undele sonore se numesc potențiale microfonice cohleare.

Unii cercetători admit că în cohlee ar avea loc o „analiză” a sunetelor conform teoriei piezoelectrice, după care, vibrația unei fibre din membrana bazilară ar exercita o serie de presiuni și depresiuni mecanice asupra celulelor corespunzătoare, care le-ar transforma în energie electrică. Fenomenul s-ar asemăna cu producerea unui potențial piezoelectric consecutiv manifestării unei presiuni mecanice pe un cristal de cuarț.

În nervul acustic se nasc potențialele microfonice, care s-ar datora modificărilor sincrone ale câmpurilor electrostatice cohleare, ca urmare a variației permeabilității membranei celulare receptoare față de ionii monovalenți în momentul comprimării cililor, ce ar produce schimbări în structura moleculară a unităților labile ale membranelor și, deci, modificarea permeabilității pentru ionii de Na^+ și K^+ .

Potențialul receptor sau microfonic determină eliberarea mediatorului chimic la nivelul sinapsei dintre polul bazal al celulei și dendritele primului neuron al căii acustice (ganglionul Corti), care va realiza potențialele de acțiune ce se vor transmite separat prin fibrele nervului acustic, în funcție de celulele receptoare active.

Fiecare fibră a nervului acustic provine dintr-un domeniu strict delimitat al cohleei, de la o singură celulă ciliată internă sau de la cele 3–4 celule ciliate externe corespunzătoare.

Cohleea este sensibilă la diverse frecvențe în diferitele sale zone, așa că fiecare fibră nervoasă poate fi maxim excitată de către o anumită frecvență.

Dacă sunetul conține frecvențe diferite, sunt excitate mai multe grupuri de fibre nervoase, iar atunci când conține o singură frecvență, doar anumite fibre vor conduce potențial microfonic spre etajele superioare. Dacă sunetul are o frecvență foarte mare, pot fi recrutate și fibrele nervoase vecine celei ce conduce frecvența corespunzătoare; este, deci, o excitație simultană a mai multor grupe de fibre nervoase.

Producerea influxului nervos se bazează pe două legi, și anume:

– legea „totul sau nimic”, conform căreia influxul nervos apare la un anumit prag de excitație și nu variază în amplitudine sau durată, indiferent dacă crește intensitatea excitantului;

– legea „perioadei refractare”, după care influxul nervos este urmat de o perioadă refractară de 1/1 000 s. Înseamnă că până la frecvența de 1 000 Hz există un răspuns automat al unor fibre specializate pentru frecvențele respective, iar peste această frecvență transmisia se face global, încât la nivelul scoarței cerebrale sunetul va fi înregistrat cu toate caracteristicile sale.

Procesul de integrare auditivă și de integrare a limbajului se realizează cu intervenția mai multor mecanisme neuro-fiziologice, printre care amintim: atenția, memorizarea, condiționarea, obișnuința.

Dacă cohleea recunoaște caracterul stimulului sonor, scoarța cerebrală diferențiază sunetele, presupunând o condiționare anterioară și o memorizare separată a acestora.

Integrarea auditivă de la nivelul cortexului va permite obținerea calității de simbol a mesajului sonor, care va deveni o noțiune abstractă și va putea fi estimat prin cuvânt. Acest proces este specific omului, care va înțelege o multitudine de mesaje sonore simbolice (cuvinte) ce vor compune limbajul. Cu ajutorul analizatorului auditiv, omul își perfecționează limbajul în mod continuu pe parcursul întregii sale vieți, bineînțeles cu participarea și a altor procese complexe intelectuale.

Orientarea corectă acustică în spațiu se realizează numai în cazul unui auz integrat bilateral, mai ales că audiația biauriculară creează și un confort superior față de cea monoauriculară. În audiația biauriculară, scade pragul de intensitate sonoră, iar localizarea sursei sonore se realizează și prin mișcările capului.

19.8.9. ADAPTAREA ȘI OBOSEALA AUZULUI

Cu cât un sunet va acționa asupra urechii umane cu o anumită intensitate și o anumită durată, cu atât sensibilitatea urechii se va reduce, după cum are și posibilitatea să crească, în condițiile unui microclimat lipsit de excitații sonore. Este vorba de o adaptare a sensibilității acustice la diferite ambianțe sonore. Dacă excitantul sonor are o intensitate și o durată oboseitoare, apar modificări degenerative la nivelul organului Corti și al neuronilor din ganglionul Corti, care vor duce la scăderea auzului sau la surditate. Excitarea sonoră îndelungată realizează modificări psiho-afective, stare generală alterată, modificări de excitabilitate a sistemului nervos vegetativ și a celui neuro-muscular, după cum cercetări mai recente au pus în evidență reducerea acuității vizuale cu peste 20% la persoanele ce lucrează timp îndelungat în condiții de zgomot obositor.

Surditatea este o înfrimare gravă, producând pierderea completă sau parțială a auzului.

După locul afectării funcției analizatorului acustic, se deosebesc mai multe tipuri de surditate:

- surditatea de transmisie, când este afectată urechea medie sau conductul auditiv extern;
- surditatea de percepție, când apar leziuni la nivelul urechii interne sau al căii nervoase acustice;
- surditatea mixtă, când sunt afectate atât dispozitivele de transmisie, cât și cele de percepție.

La copil, surditatea are mari implicații pentru dezvoltarea psihică ulterioară și, bineînțeles, pentru vorbire. Surditatea de percepție ereditară reprezintă 20–30% din surditatea copiilor. Cea câștigată se poate datina traumatismului obstetrical cu anoxia organului Corti, ca și în cazul icterului nuclear din incompatibilitatea de Rh.

Meningitele pot crea 4–9% din surditate la copil, la fel ca și infecția cu anumite virusuri neurotrope (oreion).

Există, de asemenea, și medicamente care afectează grav și ireversibil auzul, cum ar fi unele antibiotice, ca streptomicina, neomicina, kanamicina – ceea ce impune mare prudență în utilizarea lor în special la copii.

Surditatea de transmisie la copil apare, de obicei, unilateral, prin afecțiuni acute ale conductului auditiv extern sau inflamații ale urechii medii, cât și în cazul unor malformații ale urechii externe sau mijlocii.

Toți copiii surzi vor fi protezați – proteza auditivă fiind un amplificator care are drept scop restaurarea funcției auditive cât mai apropiată de cea normală. După explorarea corectă și completă a auzului, se va proteza urechea cea mai bună; la ora actuală, se experimentează implantarea unor electrozi direct în rampa timpanică, iar prin intermediul lichidelor cohleare să se poată stimula fibrele nervului acustic, specific pentru fiecare bandă sonoră.

Există și situații în care bolnavul percepe o serie de sunete (acufene) fără ca acestea să fie determinate de excitanți sonori reali, fenomen care apare în unele afecțiuni ce irită dispozitivul auditiv receptor, calea de transmisie sau segmentul său central.

19.9. ANALIZATORUL VIZUAL

Vederea reprezintă un proces complex de reflectare obiectivă a lumii, cu participarea unor formațiuni nervoase extrem de specializate.

Dacă la naștere vederea se realizează total imperfect, cu participarea unor elemente funcționale „primitive”, postnatal acestea se perfectează morfologic și funcțional, permițând funcționarea întregului sistem implicat în vedere cu maximum de capacitate. În jurul vârstei de 6 ani se consideră că dispozitivul vizual este aproape perfect, după care, cu înaintarea în vârstă, capacitatea vizuală se reduce. Este cel mai perfecționat analizator, cel care menține starea de veghe a scoarței cerebrale într-o măsură mult mai mare decât restul analizatorilor.

19.9.1. PARTICULARITĂȚI MORFO-FUNCȚIONALE

Pentru ca retina să primească radiațiile luminoase în bune condiții și să se poată realiza imaginea obiectelor pe retină, este necesară transparența perfectă a corneei, cristalinului, umorii apoase și corpului vitros.

Din punct de vedere optic, corneea prezintă o zonă centrală ușor deplasată în jos și intern, cu un diametru de 3–4 mm, cu proprietăți optice mai bune decât zona periferică. Razele luminoase ce ajung pe corneă vor fi reflectate și refractate.

Corneea joacă rolul unei lentile convergente, constituind elementul principal al dioptrului ochiului, știind că pentru fața sa anterioară refracția corespunde la 47 de dioptrii și la –5 dioptrii pentru fața posterioară. Încât rezultanta refracției corneene este de 42 de dioptrii. Corneea prezintă un astigmatism fiziologic de 0,75 dioptrii.

Pentru tot spectrul vizibil, corneea este transparentă și transmite lungimi de undă cuprinse între 300 nm (ultraviolet) și 2 500 nm (infraroșu).

Transparența corneei apare abia în luna a IV-a a vieții fetale și devine maximă spre sfârșitul lunii a VI-a. După moarte, corneea își pierde transparența, motiv pentru care se prelevează în primele 7 ore post-mortem, în vederea transplantării.

Transparența este influențată de hidratarea corneei, conținutul în apă fiind de peste 78%; în hiperhidratare, corneea devine opacă.

Sensibilitatea tactilă termică și dureroasă a corneei este deosebit de mare, pragul său de sensibilitate descrescând din zona centrală spre periferie.

De la nivelul corneei pleacă o serie de reflexe, printre care reflexul corneeo-palpebral (reflexul de clipire), reflexul iridoconstrictor, reflexul de lăcrimare, diverse reflexe vasodilatatoare.

În corneă lipsesc vasele sanguine și limfatice, iar nutriția se realizează prin imbițiție din secreția lacrimală și, în special, din umorrea apoasă, care, având Na^+ în concentrație mare, atrage apa din corneă.

Secționarea nervului V la iepure produce keratită (Magedie, 1922), probabil distrugându-se fibrele oervoase trofice pentru corneea, cât și imposibilitatea efectuării corecte a clipirii, apărând uscarea și ulcerarea corneei pînă la lipsa secreției lacrimale.

Cristalinul este o lentilă biconvexă, transparentă, învelită într-o capsulă numită cristaloidă. Masa transparentă a cristalinului conține atât fibre, cât și o substanță amorfă interfibrilară.

Cristalinul este anterior, în contact cu umoarea apoasă, are o grosime de 10–15 μm , în timp ce cristalinul posterior, în raport cu corpul vitros, are grosimea doar de 5–7 μm , fiind foarte elastică și amorfă.

Fibrele cristalinului sunt aranjate concentric, iar diametrul unei fibre nu depășește 10–15 μm și grosimea de 3–5 μm . În centrul cristalinului se găsesc cele mai vechi fibre, constituind „nucleul embrionar”, învelite într-un strat mai periferic – „nucleul fetal”.

La nou-născut, cristalinul are o formă globuloasă și, pe măsura avansării în vârstă, crește în volum, adăugându-se noi straturi de fibre, devenind mult mai dens la centru față de periferie. Cristalinul nu conține vase sanguine și limfatice, hrănindu-se din umoarea apoasă și din corpul vitros prin imbiție.

Procesul de creștere a cristalinului se continuă toată viața, iar celulele mai vechi nu se elimină și formează un nucleu dens și dur în centrul cristalinului. Conține cel mult 65% apă (50% liberă și 13% legată), fapt ce-i conferă un indice de refracție ridicat față de umoarea apoasă; deshidratarea cristalinului la bătrâni produce presbiția, iar la diabetici hiperglicemia realizează miopie, prin hiperhidratarea acestuia.

În situația în care crește presiunea osmotică a umorii apoase sau a vitrosului, apa din cristalin este atrasă către aceste medii, realizând deshidratarea sa și hipermetropie.

Cristalinul conține în fibrele sale cantități mari de K^+ , a cărui concentrație scade cu vârsta, spre deosebire de Na^+ și Cl^- , care se acumulează ca și ioni de calciu.

Cristalinul conține și mari cantități de proteine, reprezentând 35% din greutatea sa, ce se găsesc sub formă de *alfa-cristalină* – prezentă în special în straturile externe, și *beta-cristalină* – prezentă mai mult în straturile interne.

Nucleul cristalinului conține un albuminoid insolubil și mici cantități de *gamma-cristalină*, alături de nucleoproteine.

Substanța interfibrilară este constituită în special din mucoproteine – cu rol de ciment, în vederea menținerii proprietăților optice ale lentilei; prin elasticitatea acesteia, în cursul procesului de acomodare se modifică curbura cristalinului. Cu vârsta, cristalinul pierde apă, crescând concentrația albuminoidului insolubil și tendința la precipitarea cisteinei în cistioză.

Membrana cristalinului conține fosfolipide, ce-i conferă permeabilitate, conținutul în colesterol crescând cu vârsta.

Energia necesară acomodării, sintezei și degradării proteice, menținerii transparenței și a schimburilor ionice este furnizată de metabolismul glucidelor.

Cristalinul utilizează 0,2 mg glucoză/g/h, dar nu utilizează glicogenul ce ou poate traversa capsula. Glicoliza se realizează pe cale anaerobă. Capsula cristalinului prezintă o permeabilitate selectivă, în funcție de mărimea moleculară a substanței respective, deoarece prin microscopia electronică ou s-au pus în evidență pori la nivelul capsulei cristalinului. Traversarea capsulei de către diferite substanțe organice și anorganice ou se face prin simplă difuziune, ci cu consum energetic, ca rezultat al activității metabolice a stratului epitelial.

Transparența capsulei și a cristalinului depinde de starea fizico-chimică a proteinelor constitutive și de proprietățile mediului lichid din jurul lentilei.

Variațiile osmolarității umorii apoase sau a vitrosului vor atrage și variații de hidratare a cristalinului, cu modificarea complexelor proteice, pierderea transparenței și a elasticității sale.

Din cristalin s-au izolat o serie de vitamine, printre care vitaminele A, B₁, B₂, C și PP, cât și enzime glicolitice și lipolitice. Acidul ascorbic prezintă o concentrație crescută la tineri, în special în cortexul cristalinului, lipsind în nucleu. Greutatea cristalinului crește cu vârsta, fiind la naștere doar de 65 mg, iar la 60 de ani, de 220 mg.

19.9.1.1. Zona receptoare a analizatorului vizual

Elementele receptoare ale analizatorului vizual se găsesc pe retină, fiind îndreptate spre excitantul luminos, dăruind motilității globilor oculari, asigurată de musculatura lor extrinsecă.

Zona receptoare a analizatorului vizual este reprezentată în special de maculă și *fovea centralis*, ce furnizează date despre vederea clară. *Ora serrata* delimitează zona vizuală a retinei de cea nevizuală, la nivelul căreia ou se găsesc elemente receptoare pentru lumină decât în proporție extrem de redusă. Fovea centralis este prezentă la oivelul *maculei luteae*, de culoare galbenă la om și maimuță, maculă ce nu depășește 1,7–1,9 mm și care se află exact pe axul ochiului, în afara papilei nervului optic; papila nu conține elemente fotosensibile.

Dintre straturile constitutive ale retinei, un rol deosebit pentru vedere îl prezintă epiteliul pigmentar și celulele fotoreceptoare.

Epiteliul pigmentar conține un strat de celule cu pigment mai abundent în zona foveei centralis decât la periferia retinei. Celulele acestui epitelii se reînnoiesc continuu, prin migrare și nu prin mitoză. Mitochondriile și lizozomii sunt bine reprezentate în aceste celule, ca și incluziunile de lipofuscină, care constituie, ca și în alte țesuturi, un produs de degradare – mai frecvent cu vârsta. Prezența în zona apicală a ribozomilor și reticulului endoplasmatic deosebit o intensă sinteză proteică la acest nivel, alături de granulele de melanină și corpi meloizi, cu rol în izomerizarea vitaminei A.

Epiteliul pigmentar are rol protector pentru retină prin absorbția radiațiilor calorice și luminoase prea puternice, dar, în același timp, nu permite difuzia luminii spre sclerotică. În iluminarea slabă, epiteliul pigmentar favorizează reflexia luminii, crescând sensibilitatea fotoreceptorilor, în special în vederea nocturnă, pentru bastonașe. Acest epitelii are, de asemenea, un rol important nutritiv și metabolic pentru retina senzorială, mai ales că în această zonă lipsesc vasele de sânge.

Celulele pigmentare transformă vitamina A din retină, care, prin unire cu opsină, ca suport proteic sintetizat în acest nivel, va forma rodopsina. Celulele pigmentare fixează și degradează resturile discurilor fotoreceptorilor, având, deci, și un deosebit rol fagocitar. Ele fac legătura între fotoreceptori și coriocapilare, asigurând acestora atât nutriția, cât și eliminarea produsilor de catabolism.

O substanță radioactivă injectată în capilarele coroidei se va găsi mai întâi în celulele epitelii pigmentar și abia după 8–10 zile la nivelul fotoreceptorilor.

Fotoreceptorii: la om, retina conține aproximativ 130 milioane de celule cu bastonașe și 7 milioane de celule cu conuri. La nivelul foveei sunt prezente numai celulele cu conuri (150 000/ mm^2), având dimensiuni foarte mici (1,5 μm), iar spre periferie sunt prezente celulele cu bastonașe, al căror diametru nu depășește 5–8 μm . Deosebita maximă a celulelor cu bastonașe se află la o distanță de 7–8 mm de fovee, numărul lor diminuând spre periferia retinei.

Fiecare celulă receptoare este formată din mai multe zone, și anume: un segment extern, un segment intern și o zonă sinaptică. Segmentul extern pătrunde până în epiteliul pigmentar, coajinând, la rândul său, un articol extern și altul intern.

Articolul extern al bastonașelor are aspect de cilindru, ce se termină bazal cu o strânguție. Conține 600–900 de discuri floatoate sau saci membranoși, fiecare disc având un strat bimolecular de lipide cuprins între alte două straturi de proteine (fig. 19.29). Două discuri vecine sunt separate printr-un spațiu de cel mult 100 Å.

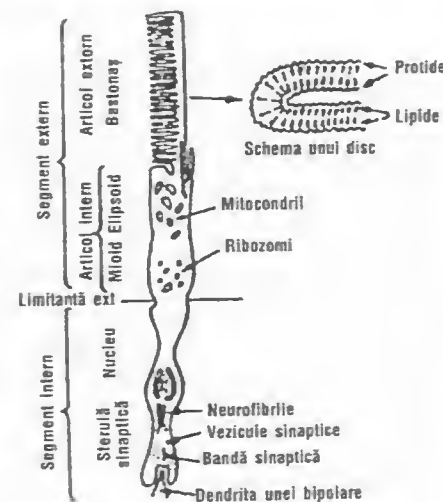


Fig. 19.29. Structura receptorilor retinieni (celulă cu bastonașe).

Articollul extern al celulelor cu conuri este mai gros și mai puțin înalt față de al bastonașelor, cu formă de piramidă, conținând 200–500 de saci membranoși suprapuși. Dubla membrană a acestora are grosimea doar de 50 Å, iar spațiul dintre membrane măsoară doar 25 Å. Față de bastonașe, distanța care separă două discuri vecine este mai mare, de aproximativ 170 Å.

Articollul intern se unește cu cel extern printr-un cil conector, cu rol de transmitător al influxului nervos. Articollul intern este format și el din două porțiuni. Porțiunea elipsoidală conține aproximativ 300 de mitocondrii alungite și doar câteva vezicule ale reticulului endoplasmatic, cât și zona bazală a cilului conector. În această regiune are loc fosforilarea ADP și formarea ATP, fiind considerată zona energetică celulară.

Cealaltă zonă a articollului intern se numește zonă mioidă, ce conține ergastoplasmă, aparat Golgi și neurotubuli, constituind porțiunea de sinteză a celulei, unde are loc sinteza lipidelor și proteinelor din constituția articollului extern, cât și a opsinelor, care vor fi vehiculate spre articollul extern prin cilul conector. Sinteza compușilor proteici și a discurilor din articollul extern este un proces permanent, ceea ce asigură reînnoirea continuă a fotopigmenților.

Articollul intern sintetizează în permanență fotopigmentul, care va migra prin cilul conector spre baza articollului extern și, de aici, spre discurile de care se atașează. La fiecare 20 de minute, zona fotoreceptoare se reînnoiește, formându-se un disc nou la 4 ore, ce înaintează spre zona apicală a articollului extern, cu o viteză de aproximativ 1,6 $\mu\text{m}/\text{zi}$, având o viață de aproximativ 9–13 zile. Lumina accelerează reînnoirea discurilor, iar întunericul o inhibă.

Extremitatea sinaptică a celulelor vizuale se află în stratul plexiform extern, având forma unei dilatații citoplasmice, numită *peduncul* la celulele cu corpuri și *sferulă* la cele cu bastonașe. În aceste dilatații se află vezicule pline cu mediator chimic, iar în invaginațiile lor membranare ajung dendritele celulelor bipolare, ce reprezintă primul neuron al căii vizuale.

19.9.1.2. Segmentul intermediar al analizatorului vizual

Primul neuron al căii optice este reprezentat de celulele bipolare, care se împart în trei categorii: unele vor face sinapsă cu celulele cu conuri, altele cu celulele cu bastonașe, iar a treia categorie poartă numele de celule bipolare gigante, prezentând arborizații dendritice numeroase, în plan orizontal, pentru sinapsă cu celulele cu conuri. Printre celulele fotoreceptoare se găsesc și celule de susținere cu rol metabolic pentru acestea, cât și neuroni de asociație și celule amacrine.

Celulele amacrine sunt interneuroni fără axoni, încât o singură terminație primește și transmite mesajul. Se pare că aceste celule răspund conform legii „totul sau nimic”, fiind sensibile și la variațiile de luminozitate. Aceste celule realizează pe neuronul bipolar un fel de sinapsă de retroacțiune, cu scopul modulării răspunsului acestuia.

De altfel, unele celule bipolare sunt localizate central în retină și primesc sinapsa celulelor receptoare, iar altele, situate periferic, fac legătura cu celulele amacrine și cele cu arborizații orizontale, ce au rol de interneuroni.

Celulele ganglionare sau multipolare culeg, selectează și prelucerează informațiile primite de la celulele bipolare și amacrine.

Implantarea de microelectrozi la nivel retinian a arătat că există trei categorii de celule ganglionare: celule cu rol excitator tip „on”, celule cu rol inhibitor tip „off” și celule de tip „on-off”.

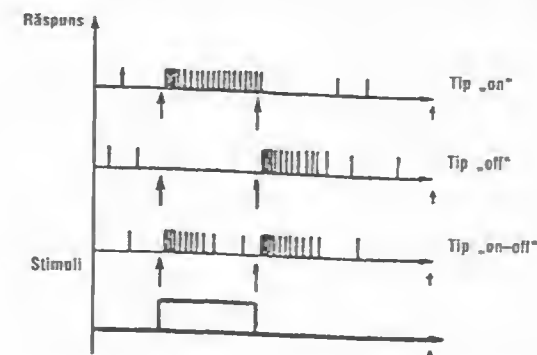
Celulele cu rol excitator cresc ritmul impulsurilor primite, apoi le stabilizează la o valoare de fond. Celulele cu rol inhibitor descarcă spontan numai în momentul întreruperii iluminării, având maximum de activitate în întuneric și fiind în inhibiție atunci când retina este luminată.

Celulele de tip intermediar („on-off”) descarcă ritmic impulsuri atât la conectarea, cât și la deconectarea luminii, iar în timpul iluminării continue nu mai au activitate (fig. 19.30).

În centrul retinei, fiecare celulă ganglionară primește informații de la un singur con, iar în restul retinei o celulă ganglionară primește impulsuri de la mai multe celule receptoare.

Există celule ganglionare ce decelează intensități mici și extrem de mici ale iluminării, cum sunt cele din zona maculară, care sesizează și detaliile de formă. Alte celule ganglionare, mai periferice, decelează neregularități de iluminare și vor descărca impuls doar atunci când tot câmpul este uniform iluminat sau întunecat.

Fig. 19.30. Răspunsul celulelor ganglionare la stimulii luminoși.



Baleiajul realizează o multitudine de impulsuri „on-off” la periferia imaginii și detectează toate neregularitățile conturului obiectelor.

Cu alte cuvinte, celulele de tip „on” semnalizează începutul excitației, cele de tip „off” vor indica sfârșitul acesteia, iar celulele intermediare vor arăta variații în timp ale intensității stimulului luminos.

Celulele ganglionare prezintă o mare plasticitate. Lumina nu este absolut necesară în faza lor de dezvoltare, dar lipsa stimulului luminos după această perioadă duce la pierderea integrității lor funcționale. Este cazul copiilor operați prea târziu de cataractă congenitală.

Nervii optici constituți din axonii celulelor multipolare retiniene (al doilea neuron al căii), după ce părăsesc globul ocular, pătrund în craniu, încrucișându-se parțial și formând chiasma optică, fibrele din zona nazală a retinei având un procentaj mai mare de încrucișare decât cele din zona temporală. După formarea chiasmei optice, calea optică se continuă sub numele de tractusuri optice – drept și stâng – cuprinzând fiecare din ele fibre de la ambele retine.

În drumul său spre cortex, calea optică face releu la nivelul corpului geniculat extern din metatalamus, ce constituie al treilea neuron al căii optice, după care, sub numele de radiații Gratiollet, se îndreaptă spre stratul 4 al ariei 17 din scizura calcarină (fig. 19.31).

Distrugerea unei zone de pe retină va produce degenerarea fibrelor optice până la zona corespunzătoare corpului geniculat extern, cât și degenerarea punctiformă a cortexului calcarin, încât se poate vorbi nu numai despre o retinopatie corticală, ci și de una a corpului geniculat extern.

La nivelul zonei dorsale geniculate se proiectează fibrele maculare, iar rostral și mai puțin precis, fibrele ce provin de la periferia retinei.

Câteva fibre optice ajung și la ariile 8 și 19, după releu în corpul geniculat extern, în vederea mișcării laterale conjugate a globilor oculari.

Deviațiile involuntare ale globilor oculari spre dreapta sau spre stânga pun diagnostic de leziune a ariei motorii 8 frontale. Se spune că „bolnavul își privește leziunea”.

O mică parte din fibrele căii optice, după releu în corpul geniculat extern, face sinapsă și în nucleul postero-lateral din talamus (pulvinar), nucleu de asociație, cu rol de asamblare a excitațiilor somestezice, vizuale și auditive, pe care le proiectează în zona temporo-parieto-occipitală. În același timp, o altă parte din fibrele optice se angajează în releu cu sistemul reticulat

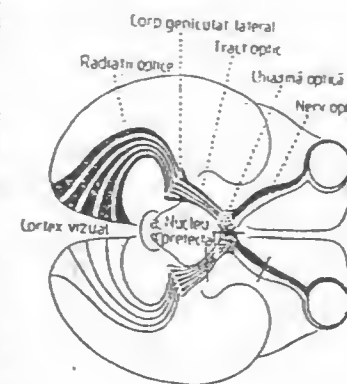


Fig. 19.31. Calea optică.

activator ascendent, ceea ce aduce în discuție existența unei relații retino-reticulo-corticale, cu rol în modelarea gradului de vigilență.

Prin brațul conjunctival anterior va pleca de la corpurile geniculate externe la tuberculii cvadrigemeni anteriori un număr de fibre optice; de aici vor pleca altele spre nucleii de origine ai tracturilor tecto-spinale și tecto-nucleare implicate în controlul extrapiramidal al motricității. Alte fibre vor ajunge la centrul iridoconstrictor mezencefalic, cât și la centrul iridodilatator Budge din măduva cervicală.

Fibrele izolate ale nervului optic răspund diferențiat la stimulul luminos, ceea ce le clasifică în trei grupe:

- în prima grupă intră fibrele în care numărul de mesaje crește imediat ce începe iluminarea (efect „on”). Acest fenomen se menține un timp scurt, intervenind fenomenul de adaptare (efect „off”);
- în grupa a 2-a intră fibrele optice la care efectele „on” și „off” apar la începutul și sfârșitul iluminării, iar intensitatea influxului crește ușor și progresiv;
- în grupa a 3-a de fibre are loc o dispersie a tuturor mesajelor pe tot parcursul iluminării. Ar fi vorba despre un fel de inhibiție a transmiterii influxului nervos.

S-au pus în evidență și la mamifere trei categorii de răspunsuri în fibrele nervului optic, corespunzătoare celor trei tipuri de celule ganglionare. La animalele cu retina compusă numai din celule cu bastonașe (cobai), majoritatea fibrelor nervului optic este de tip „on”, iar la cele cu retina de tip mixt (pisică), majoritatea fibrelor răspunde „on-off”.

Informațiile ajunse la retină sunt mai multe, comparativ cu cele transmise creierului, ceea ce dovedește că retina, prin celulele ganglionare multipolare, selectează informațiile și le transmite sintetizate scoarței cerebrale.

Pentru retina centrală, fiecare punct are corespondent un alt punct cortical, în timp ce pentru retina periferică, datorită convergenței, imaginea retiniană nu se transmite punct cu punct, ci se realizează comparația între stimuli, selectându-se numai cei ce interesează creierul.

Nervul optic va transmite atât semnale luminoase, semnale referitoare la limita și contrastele vizuale, semnale privind modificările intensității luminoase, cât și semnale colorate, ce vor modifica frecvența potențialului de acțiune în funcție de lungimea de undă a luminii. Nervul optic în totalitate răspunde unitar (nu ca fibrele sale izolate) printr-un efect bifazic de sumare a potențialelor fiecărui axon din componența sa anatomică.

În corpurile geniculate laterale, impulsurile excitatoare și inhibitoare ale două sau mai multor celule ganglionare converg spre un singur neuron geniculat, încât fiecare neuron va răspunde la un câmp receptor retinian. Dacă excitarea centrului câmpului retinian produce răspuns „on” sau „off” în neuronii corespunzători ai corpului geniculat, excitarea zonei periferice a acestuia va realiza răspunsuri de sens opus.

Celulele corpului geniculat analizează mai bine decât celulele retiniene variațiile spațiale ale iluminării retinei, realizând diferențe de răspuns între un stimul slab central și o iluminare difuză.

19.9.1.3. Segmentul central al analizatorului vizual

Segmentul central al analizatorului vizual este reprezentat de aria 17 din lobul occipital, celulele cortexului vizual fiind specializate pentru fiecare grup de fibre optice. De altfel, neuronii cortexului vizual primesc în egală măsură și influențe excitatoare și inhibitoare ale aferențelor nespecifice reticulo-talamice, cât și aferențe inhibitoare vestibulare. Aria 17 este conectată cu ariile: motorie 8 și sagitală 19, realizându-se și relații senzorio-motorii, încât aria striată pare a fi locul unde converg diverse aferențe și unde se realizează integrarea mesajului vizual cu cel nespecific și vestibular (fig. 19.32).

Din activitatea conjugată a multitudinii de neuroni din cortexul vizual putem aprecia forma obiectelor, poziția lor, orientarea în spațiu, culoarea etc. Dacă un ochi este trecut de la întuneric la lumină, în primele momente ale iluminării se culeg potențiale corticale cu frecvență mare (efect „on”), iar dacă iluminarea se prelungește, numărul potențialelor evocate scade până la o valoare medie, fenomen cunoscut sub numele de adaptare (efect „off”).

Îmoarcerea în obscuritate produce din nou un răspuns „off”, de multe ori sub forma unei inhibiții (abolirea influxului), apoi o accelerare scurtă a acestuia și, din nou, o revenire la ritmul descărcărilor din

repaus. Folosind microelectrozi, s-a scos în evidență faptul că mai mult de jumătate din neuronii corticali vizuali sunt indiferenți la variațiile de iluminare a retinei și că aceștia au rol în producerea ritmului alfa de pe EEG. Altă categorie de neuroni răspunde prin efectul „on” sau „off”, constituind adevărații neuroni corticali receptori pentru influxul vizual.

Distrugerea bilaterală a ariei 11 duce la dispariția senzațiilor vizuale, după cum distrugerea ariilor 18 și 19 nu dă posibilitatea recunoașterii obiectelor. Stimularea acestor zone la adult produce halucinații vizuale („stele verzi”), ca și în cazul traumatismelor puternice occipitale.

La nivel cortical, retina este proiectată punct cu punct. Implantarea microelectrozilor în cortexul occipital a evidențiat faptul că fiecare neuron din aria 17 răspunde la excitarea unei anumite zone din retină.

Celulele corticale simple răspund numai la stimulii retinieni liniari, în timp ce celulele corticale complexe sesizează numai deplasarea conturului liniar, care devine continuu. Celulele hipercomplexe răspund și la stimulii liniari și la cei perpendiculari, care formează un oarecare unghi, cu condiția ca stimulul să aibă o anumită durată. În aria 17 se găsesc în special neuronii simpli, iar cei complecși se găsesc în ariile 17, 18, 19, în timp ce neuronii hipercomplecși ocupă ariile 18 și 19.

Fiecare celulă corticală răspunde specific la forma, mărimea, deplasarea sau orientarea stimulului. Convergența corticală este evidentă, deoarece proiectarea unei zone întinse retiniene are loc pe un câmp receptor cortical redus, după cum fiecare punct retinian va stimula un oarecare număr de celule corticale. Raportul dintre stimulii excitatori și inhibitori realizează contraste ce ajung la cortex, unde neuronii sunt sensibili doar la stimulii luminoși ce au o anumită orientare, ceea ce stă la baza percepției contururilor.

Cortexul vizual este format dintr-o multitudine de unități funcționale sub forma unor coloane independente, conectate cu corpurile geniculate laterale, realizând un fel de mozaic cortical (cu formă ovală, alungită sau rotundă).

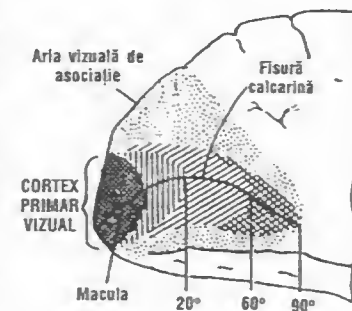


Fig. 19.32. Proiecția corticală a vederii.

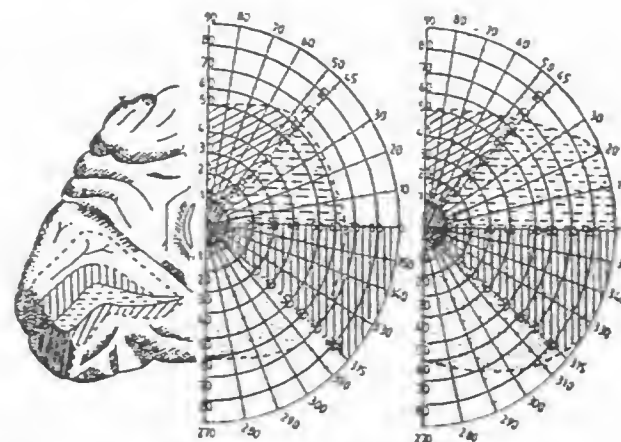


Fig. 19.33. Proiecția pe scoarța cerebrală a diverselor zone din câmpul vizual.

Dacă retina descompune imaginea în semnale luminoase, scoarța occipitală o recompilează, pentru că în cortexul occipital se găsesc peste 200 milioane de neuroni, de 200 de ori mai mult decât în fibrele nervului optic. 4/5 din celulele corticale primesc informații de la ambii ochi, după cum există celule corticale impresionate doar de retina homolaterală sau de cea controlaterală.

Ariile 18 parastriată și 19 peristriată sunt organizate în coloane perpendiculare și cei mai mulți din neuronii acestor arii sunt stimulați de către excitațiile ambelor retine.

Cercetări de neurofiziologie efectuate pe maimuță și pisică au pus în evidență faptul că, la naștere, neuronii ariei striate sunt stimulați în proporție egală de către ambii ochi. La 3-4 luni după naștere, 80% din celule răspund binocular și doar 14% monocular, în proporție egală pentru ochiul drept și pentru cel stâng, iar 6% din celule nu răspund la excitația retinei. Dacă un ochi este occluzionat timp de 3-4 săptămâni, neuronii corticali vor reliefa răspunsuri anormale. Se constată leziuni histologice doar la nivelul celulelor corpului geniculat, care se reduc ca număr, devin mai mici, scade numărul de ribozomi, denotând afectarea sintezelor proteice. Aceste modificări nu dispar dacă iluminarea corectă a retinei se realizează mai târziu. Iată de ce este absolut necesar stimulul luminos pentru funcționarea perfectă a întregului angrenaj vizual între retină și cortex.

Zona temporală retiniană are proiecția în partea cea mai anterioară a scizurii calcarine, în timp ce macula se proiectează cel mai posterior pe scizură și bilateral, datorită fibrelor directe și încrucișate (fig. 19.33).

Afectarea diferitelor porțiuni ale segmentului de conducere a analizatorului vizual realizează diverse aspecte clinice (cecitate, hemianopsie, scotom) (fig. 19.34).

19.9.2. MECANISMUL FOTORECPTIEI

Sensibilitatea retinei. Excitantul fiziologic al retinei este lumina, adică radiațiile spectrului electromagnetic la care este sensibilă. Ochiul omului percepe radiații cuprinse între cele infraroșii și ultraviolete, adică cu o lungime de undă între 0,390 μm pentru violet și 0,760 μm pentru roșu. Sursa luminoasă poate fi reprezentată fie de o emisie de radiații luminoase de la un obiect care arde (chibrit, lămpă), fie de la un obiect ce reflectă o lumină primită (un perete luminos) etc.

Sensibilitatea retinei depinde de o serie de factori, printre care amintim:

a) **natura luminii:** se știe că lumina monocromatică conține radiații apropiate ca lungime de undă, iar cea policromatică, numită și lumină albă, este emisă de corpurile care au o temperatură de aproximativ 5 200°K; spectrul său este continuu;

b) **intensitatea și durata iluminării,** cât și **suprafața retinei stimulate;**

c) **dimensiunea sursei de lumină,** ce variază de la aspectul punctiform, până la diverse mărimi. În cazul sursei punctiforme, se excită un număr extrem de mic de receptori retinieni sau chiar unul singur. În al doilea caz, interesează numărul de fotoni care atinge retina, fiind o netă proporționalitate între acesta și calitatea stimulării retiniene;

d) **durata iluminării** are o mare importanță, depinzând de cantitatea de energie luminoasă absorbită (când crește luminescența, scade timpul de iluminare). Pentru a avea o imagine clară pe retină, se impune un minimum de timp de expunere, ca și în cazul fotografierii, timp ce variază cu intensitatea și culoarea luminii;

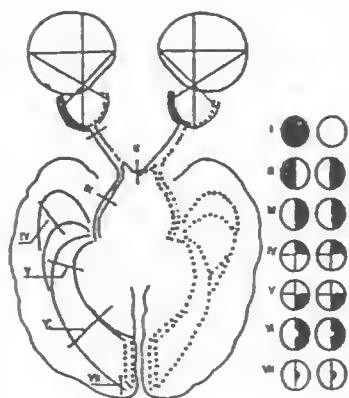


Fig. 19.34. Tulburări de vedere în afectarea căii optice.

e) **zona retiniană, iluminată,** știind că la periferie retina este sensibilă la iluminare slabă (vederea nocturnă – scotopică; *skotoma* = obscuritate), iar la nivelul foveei va fi stimulată numai de lumina puternică (vedere diurnă – fotopică).

Lumina este policromatică, chiar dacă este naturală sau artificială, și are posibilitatea să se descompună în culorile componente cu ajutorul unei prisme. Componentele colorate ale luminii se deosebesc prin lungimea lor de undă, realizând imaginea unui curcubeu. Vidul absolut este un mediu perfect transparent pentru toate radiațiile, în rest celelalte medii sunt absorbite de lumină, cantitatea de lumină absorbită fiind independentă de intensitatea luminoasă, dar depinzând de lungimea de undă. Retina absoarbe diferențiat lumina, în funcție de prezența la nivelul său a diversilor receptori specifici pentru excitații luminoase.

Încă din 1876, se cunoaște faptul că bastonașele conțin un pigment fotosensibil, numit purpur retinian sau eritropsină (rodopsina \rightarrow *rhodon* = roz; *opsis* = aspect), cu greutatea moleculară de 270 000, precum și porfiropsina, descoperită mai recent. Conurile conțin alți pigmenți, cum ar fi iodopsina și cianopsina.

Rodopsina are aceeași structură chimică la toate animalele, fiind o cromoproteină care, sub influența luminii, se descompune într-o proteină (opsina) și un derivat de vitamină A – neoretinol „b”, ce îi conferă colorația purpurie.

Opsina este în realitate o lipoproteină cu greutate moleculară de 40 000, deosebindu-se foarte puțin de la o specie la alta. Opsina rodopsinei se mai numește scotopsină, iar cea a iodopsinei din celulele cu conuri se mai numește și fotopsină. La lumină, rodopsina se decolorează iar în obscuritate își recapătă culoarea.

În aproximativ 5 minute de iluminare se descompune întreaga cantitate de rodopsină din retină, iar după 7 minute de obscuritate se resintetizează peste 50%, încât regenerarea pigmentului este mai lentă decât descompunerea sa.

Porfiropsina a fost descoperită la amfibii și la unii pești, având o compoziție chimică foarte apropiată de a purporei retiniale și un maximum de absorbție pentru lungimi de undă ceva mai mari decât ale rodopsinei.

Pigmenții celulelor cu conuri care populează fovea sunt reprezentați de iodopsină și cianopsină, iodopsina fiind un pigment violet, iar cianopsina – bleu (440 nm). În fovea ochiului de om s-au pus în evidență un pigment cu care percepem culoarea verde (0,540 μm) și altul pentru culoarea roșie (0,590 μm). Lumina izomerizează acest pigment la fel de ușor ca și în cazul rodopsinei, dar regenerarea lui este de 3-4 ori mai lentă decât a acesteia. Lipsa unuia sau a ambilor pigmenți produce discromatopsia (*dis* = dificultate, *chroma* = culoare, *ops* = vedere).

Pigmenții retinieni se diferențiază prin existența în compoziția lor a vitaminei A₁ și A₂ și prin opsinele particulare din conuri și bastonașe. Important este că deficiența de vitamină A produce imposibilitatea vederii clare în timpul zilei, boală numită hemeralopie (*hemera* = ziua).

Stimularea retinei. Magendie, în 1813, a urmărit apariția imaginii retiniene a obiectelor plasate în câmpul vizual al unui iepure alb (la care coroida nu are pigment) și a observat că optograma obținută seamănă perfect cu cea formată într-o cameră fotografică.

Retina este considerată a fi un diverticul invaginat al encefalului, sensibil la lumină numai în zonele în care conține celule cu conuri și bastonașe, singurele elemente receptoare ale stimulului luminos.

Lumina constituie un excitant pentru retină, deoarece energia fotonilor săi este absorbită de către pigmenții prezenți în celulele cu conuri și cu bastonașe. Această energie fotonică nu se descompune decât foarte puțin la căldură, încât fiecare cuantă de lumină participă aproape în totalitate la procesele născătoare de senzație luminoasă.

Microscopul electronic a pus în evidență faptul că pigmenții sunt plasați pe conuri și bastonașe în straturi plane și paralele și nu se găsesc în soluții simple, ci într-o formă apropiată de stadiul cristalin, numit și stadiul de „cristal lichid”.

Fotonii decolorează purpurul retinian și, în același timp, eliberează energia necesară transportului de sarcini electrice ce vor duce la apariția potențialului de acțiune în terminația axonică a celulelor cu conuri și bastonașe.

Prin implantare de microelectrozi în celulele vizuale ale retinei de pește (crap) se înregistrează un potențial cu durata de 10 ms și cu amplitudinea de 5 mV, variabilă în funcție de lungimea de undă a excitantului.

Acest potențial de recepție se datorește fenomenelor electrice de membrană, cu creșterea bruscă a permeabilității acestora pentru Na^+ și K^+ , realizând un raport de 1/100 000 între energia fotonului excitant și intensitatea răspunsului. Potențialul receptor apărut în articolul extern se transmite prin cilul conector până la articolul intern, unde apare potențialul de acțiune ce depinde de raportul intensitate-timp al potențialului de recepție. Articolul intern va suma temporar semnalele primite, realizând o gradare a răspunsului, iar, la nivelul sferulei sinaptice care se comportă ca un axon, sunt generate potențiale postsinaptice.

Celulele bipolare vor modula potențialul primit și vor produce răspunsul luminos sau răspunsul cromatic. În acest proces, se presupune participarea unui sistem enzimatic complex, ce amplifică energia fotonului, ducând-o la valoarea *spike*, potențial capabil să se propage.

Senzația luminoasă este legată direct proporțional de numărul de fotoni absorbiți de către pigment. Tehnici moderne de explorare electro-fiziologică au arătat că există o curbă de absorbție în funcție de lungimea de undă a radiațiilor, stabilindu-se un maxim al curbei pentru culorile galben-verde (5 000–5 500 Å), căruia i s-a dat valoarea arbitrară de 100. Din acest motiv, retina este considerată ca cel mai perfecționat detector de radiații luminoase.

Pragul sensibilității retinei este variabil în funcție de momentul în care se află ochiul, încât, după o expunere îndelungată în obscuritate, crește considerabil sensibilitatea retinei față de iluminarea slabă și doar câțiva fotoni pot constitui pragul excitației luminoase.

Senzația luminoasă. Senzația luminoasă nu apare decât atunci când stimulul are o anumită intensitate, iar creșterea valorii stimulului va intensifica și valoarea senzației luminoase, dar numai până la un anumit nivel, după care apare o jenă vizuală, numită *ebulsare* (lumina care produce ebulsarea este de 10 miliarde de ori mai intensă decât pragul).

Senzația luminoasă apare după un anumit timp de la aplicarea stimulului (timp de latență), care va fi cu atât mai scurt, cu cât intensitatea acestuia este mai puternică. Timpul de latență are o durată minimă de 1/10 s, timp în care se descompune pigmentul vizual și se transmite influxul nervos în lungul căilor optice. Dacă stimularea retinei are loc la periferia sa, timpul de latență crește, după cum latența pentru stimulul roșu este mai mică cu 4/100 s decât pentru cel albastru.

Dacă stimularea luminoasă are o durată prea mare, intervine fenomenul de adaptare sau oboseală a receptorilor vizuali, după cum, dacă stimulul este blocat, senzația luminoasă nu dispare brusc, ci mai persistă aproximativ 0,15 s, proces ce stă la baza fenomenului de fuziune.

Pentru vederea fotopică, o excitație foarte scurtă produce un răspuns retinian în mai puțin de 0,35 s (un disc cu zone albe și negre dacă se învârteste foarte rapid în fața ochilor lasă senzația de culoare gri și nu se sesizează zonele albe și negre ale acestuia). S-a observat, de asemenea, că iluminarea foarte puternică a retinei lasă o impresie luminoasă încă un timp după încetarea iluminării, fenomen cunoscut sub numele de *remanență* (când fixăm cu privirea un obiect foarte luminos îl mai vedem încă un timp, chiar dacă închidem ochii).

Faza de remanență este variabilă cu lungimea de undă, fiind mai mare pentru culoarea albastră decât pentru cea roșie.

Stimularea intermitentă a retinei (fenomenul de licărire). Se realizează utilizând o serie de scânteieri luminoase, a căror frecvență medie să fie de 15/s. Apare o senzație luminoasă mai puțin agreabilă, de fulgerare, pentru că stimulul luminos cade pe retină în faza post-imaginii pozitive a stimulului precedent, iar stimulul ce urmează va produce o imagine mai luminoasă decât cea anterioară.

Dacă frecvența stimulilor luminoși depășește 40/s, are loc fuziunea imaginilor și nu se mai percepe discontinuitatea luminoasă.

Pentru a obține fuziunea atunci când crește progresiv intensitatea iluminării, este nevoie și de o frecvență mai mare de stimulare. La intensități joase, frecvența critică de fuziune scade la nivelul conurilor și crește la nivelul bastonașelor, iar la intensități mari, fenomenul are loc numai la nivelul conurilor.

Cu cât stimularea retinei este mai periferică, cu atât frecvența critică de fuziune este mai scăzută, iar valoarea sa este puțin mai mare în zona nazală retiniană, față de cea temporală.

În cazuri de oboseală sau la persoanele în vârstă, sensibilitatea retinei este mai redusă, motive care scad și frecvența critică de fuziune, după cum, în vederea binoculară, acest parametru crește față de vederea monoculară. În cinematografie, folosind 15 imagini/s, se pot reconstitui ușor o mișcare, o conduită.

Adaptarea retinei la lumină. Tehnicile de electro-fiziologie și de biochimie modernă au pus în evidență faptul că la baza procesului de adaptare la lumină a retinei stau două mecanisme: *fotochimic* – bazat pe reacțiile chimice produse de stimulul luminos asupra purporei retiniane, și *electro-fiziologic* – prin care se transformă energia fonică absorbită la nivelul pigmentilor în trenuri de influx nervos, a căror frecvență depinde de intensitatea excitantului luminos și de răspunsul „on” sau „off” al receptorilor retinieni.

Retina este considerată un organ senzorial, datorită prezenței în structura sa a celulelor receptoare pentru lumină. Celulele cu bastonașe nu prezintă sensibilitate cromatică, dar pot aprecia diferența de iluminare a obiectelor, asigurând vederea în seminobscuritate – vederea crepusculară.

Sensibilitatea celulelor cu conuri este cromatică. Cu ajutorul conurilor se disting obiectele, sunt văzute clar și li se apreciază culoarea. Se consideră că păsările diurne care se hrănesc cu insecte colorate prezintă pe retina lor în special celule cu conuri, în timp ce păsările de noapte conțin pe retină în special celule cu bastonașe. Retina șobolanului alb nu conține celule cu conuri, încât nu poate fi condiționată la anumite culori.

Macula lutea din retina omului conține în exclusivitate celule cu conuri, care devin tot mai reduse numeric spre periferia retinei, unde predomină celule cu bastonașe.

În condițiile iluminării slabe, vederea se datorește celulelor cu bastonașe, iar în iluminarea puternică vedem în special cu celulele maculare.

După expunerea ochiului o perioadă mai lungă de timp în condiții de obscuritate, sensibilitatea la lumină slabă scade, ceea ce arată posibilitatea conurilor de a se adapta mai rapid decât bastonașele.

19.9.3. ACUITATEA VIZUALĂ

Acuitatea vizuală este specificitatea ochiului de a distinge separat două puncte vecine, cu condiția ca distanța dintre ele să fie de câțiva milimetri („minimum separabil”), iar apropierea de ochi să nu furnizeze un unghi mai mic de 1 minut.

Ca exemplu se pot da două puncte luminoase distanțate la 1 mm și care vor fi văzute separat de către un ochi normal de la 3,40 m. În acest caz, unghiul vizual este de 1 minut, iar acuitatea vizuală a ochiului respectiv de o unitate. Acuitatea vizuală diferă în funcție de zona retinei care primește excitantul luminos. Macula lutea are o acuitate vizuală de 150 de ori mai mare decât zona periferică a retinei. Pentru un unghi vizual de 1 minut, se formează pe retină o imagine amplă de 4 μm, încât două puncte luminoase nu vor fi văzute separat decât atunci când imaginile lor formate pe retină se vor afla la o distanță de cel puțin 4 μm, ce corespunde unui unghi de 1 minut.

Acuitatea vizuală crește proporțional cu gradul iluminării, dar numai până la un punct, după care începe să scadă. Dacă privim două foi de hârtie albă, una din ele plasată pe un fond negru, aceasta din urmă ne va părea mai strălucitoare. A intervenit *fenomenul de contrast*. Cu cât diametrul pupilei este mai mare, cu atât acuitatea vizuală este mai bună.

Vederea binoculară este întâlnită în mod normal la om. Imaginea este bună și vederea va fi clară atunci când se privește cu ambii ochi, când sunt stimulate pe retină puncte simetrice și se formează o singură senzație luminoasă. Dacă pe retină sunt excitate puncte necorespunzătoare, atunci apare o imagine dublă – *diplopia*. Pentru a repera corect un obiect în spațiu trebuie să intervină atât convergența globilor oculari, care să-și modifice poziția axelor spre obiectul privit, cât și acomodarea cristalinului.

După ce procesul de fuziune corticală s-a perfecționat, indiferent dacă un obiect este privit cu un singur ochi sau cu ambii ochi, imaginea rezultată este unică.

La nivel cortical se vor fuziona imaginile, încât apare o corespundență între zonele nazale și temporale ale celor două retine: zona

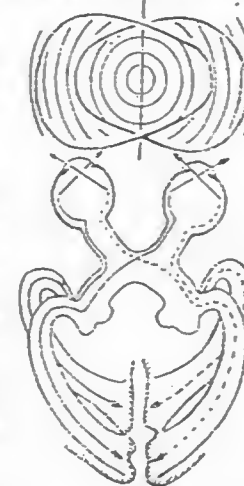


Fig. 19.35. Câmp vizual binocular.

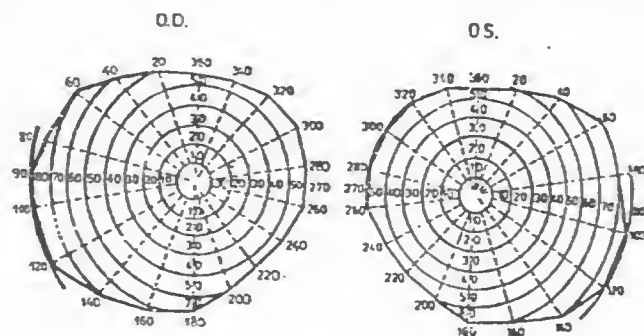


Fig. 19.36. Câmp vizual normal. O.D., ochi drept. O.S., ochi stâng.

națială a retinei uoiei ochi devine zonă corespunzătoare a retinei temporale din celălalt ochi și invers. Această corespondență se bazează pe câștigarea, prin experiență vizuală, a posibilității realizării celor mai complexe circuite neuronale în scoarța striată, cât și a perfecționării progresive a reflexului de fixație maculară. Capacitatea de fuzionare a celor două proiecții corticale ale retinei vizează să completeze procesul nervos condiționat care stă la baza acesteia și definește vederea binoculară (fig. 19.35).

Un obiect va lăsa imaginea de unicat numai atunci când se proiectează pe cele două retine în zone absolut corespunzătoare. Câmpul vizual normal este prezentat în fig. 19.36.

19.9.4. VEDEREA CULORILOR

Culorile sunt radiații luminoase cu diverse lungimi de undă pe care fiecare din noi le apreciază personal. Există culori simple și culori compuse, cele simple se mai numesc culori spectrale și aparțin unui spectru continuu cuprins între roșu și violet. Culorile compuse apar din amestecarea a cel puțin două radiații simple (dicromatism) sau a mai multor radiații simple (policromatism). Atunci când asupra ochiului acționează simultan un fascicul luminos roșu și altul bleu, avem impresia culorii violet, după cum acțiunea simultană a unui fascicul galben și a uoiei bleu lasă impresia culorii verzi.

Două culori simple sau compuse se numesc complementare când prin amestecarea lor se obține culoarea albă. Dacă o suprafață absoarbe toate radiațiile luminoase, aceasta ne va apărea neagră, iar, dacă nu absoarbe nici una, va fi albă; va apărea roșie când vor fi absorbite radiațiile galbene, cele verzi și cele albastre. Culoarea obiectelor depinde de gradul lor de luminozitate și de calitatea iluminării. Scăderea intensității de iluminare produce nuanțe de gri corpurilor albe și de brâu celor roșii. Din contră, dacă iluminăm puternic un corp gri, acesta ne va apărea alb, iar uoul brun va apărea roșu.

Senzațiile cromatice se pot defini prin trei parametri, și anume: tonalitate, saturație și luminozitate.

Tonalitatea apreciază calitatea cromatică a senzației respective și depinde de lungimea de undă care o produce. Deși se descriu 7 culori spectrale, ochiul poate deosebi peste 140 de nuanțe colorate.

Saturația apreciază din punct de vedere calitativ componenta spectrală a fasciculului luminos ce atinge retina. Dacă fasciculul incident conține o mulțime de radiații din spectrul vizibil, vorbim despre o saturație mică, cu tonalitate de alb sau cenușiu. Dacă fasciculul incident este format din radiații foarte apropiate, dintr-o bandă foarte îngustă a spectrului vizibil, vorbim despre saturație maximă sau culoare așă-zis „pură”.

Luminozitatea (strălucirea) este un parametru cantitativ al senzației cromatice, indicând intensitatea acesteia.

Sensibilitatea cromatică a retinei. Radiațiile luminoase nu impresionează ochiul cu aceeași intensitate. Retina are un maximum de sensibilitate pentru culorile galben și verde și un minimum pentru extremitățile spectrului vizibil. Pentru culoarea albă, sensibilitatea ochiului este medie.

Când iluminarea scade, ochiul este mai sensibil la culoarea bleu decât la cea roșie, iar, în condițiile iluminării obișnuite, fenomenul este invers (fenomen Purkinje).

În zona maculară, unde predomină celulele cu conuri, retina are maximum de sensibilitate a culorilor, diferențind ouanșele de culoare și apreciindu-le cantitativ.

Lucrările lui Maxwell (1865) au arătat că cele mai diverse senzații colorate se obțin prin amestecul celor trei culori fundamentale – roșu, verde și albastru, completând astfel teoria tricromatică a lui Young și Helmholtz.

O persoană antrenată are posibilitatea să distingă peste 140 de nuanțe din spectrul luminii albe. Teoria tricromatică este admisă și astăzi, pentru că tehnici moderne de electro-fiziologie au putut evidenția răspunsul diferit al conurilor față de lungimea de undă folosită corespunzătoare celor trei culori fundamentale.

Metoda reflexodensitometrică poate studia lumina care ajunge pe retina comparativ cu cea care se reflectă înainte și după epuizarea fotopigmentului, precizând că fiecare tip de „con” conține numai o singură substanță fotosensibilă. S-au identificat pigmenții fotosensibili pentru cele trei culori fundamentale, denumindu-se *eritrolab* pentru roșu, *clorolab* pentru verde și *cianolab* pentru albastru. Proporția celor trei tipuri de conuri diferă de la o persoană la alta, încât cercetări recente de electro-fiziologie oculară arată că peste 75% din conuri răspund la culoarea roșie, doar 10% la cea verde și 16% pentru culoarea albastru.

Transmisia la cortex a excitantului colorat nu se face separat pentru fiecare din cele trei culori. Există o împerechere cromatică (Hering) transmisă pentru alb-ogru, roșu-verde, galben-albastru, încât, dacă stimulul alb-ogru poate transmite și ouanșele de gri, celelalte sisteme ou-și amestecă culorile niciodată (un semnal roșu îl anulează pe cel verde). Prezența în celulele ganglionare retinene a sistemelor „on”-„off” arată că unele din ele sunt excitate de o anumită culoare, iar altele sunt inhibitate de culoarea complementară.

Teoria tetracromatică a lui Hering aduce în discuție prezența a patru culori fundamentale, admițând existența a trei cupluri de pigmenți, și anume: pentru senzațiile alb-negru, galben-albastru, roșu-verde; din catabolismul pigmenților respectivi ar rezulta culorile calde (alb, roșu, galben), iar din anabolismul acestora ar rezulta gama culorilor reci (albastru, verde, ogru).

Ambele teorii se completează una pe alta, dar ou pe deplin. Tulburările de vedere a culorilor poartă oumele de discromatopsii, care pot fi congenoitale sau dobândite și care pot interesa unul sau mai mulți receptori cromatici. Suot persoane care nu au pe retina decât un singur receptor cromatic (acromatopsie), fiind în imposibilitate de a vedea vreo culoare și sesizând doar variațiile de luminozitate; lipsa receptorului pentru roșu se oumește daltonism. În discromatopsiile congenitale, subiecții ou percep una sau mai multe culori, ceea ce dovedește o disfuncție selectivă a sistemului fotopic.

Se consideră că deficitul genetic pentru culoarea roșie și cea verde ar fi localizat pe cromozomul X, anomalia fiind mai frecventă la bărbați, care posedă doar un singur cromozom X, față de femei, care prezintă XX și care ar trebui să aibă la ambii cromozomi gena anormală; dacă oumai un cromozom X are deficiență genetică, femeia vede normal culorile, dar poate transmite la urmași anomalia. Ca urmare, bărbații prezintă discromatopsie în procentaj de 8%, iar femeile doar de 0,6%, acromatopsia întâlnindu-se foarte rar (0,003%).

Leziunile occipitale se însoțesc de agnozii cromatice, adică imposibilitatea recunoașterii unei culori, deși fotoreceptorii retinieni suot normali.

Stimularea unei mici zone din fovea arată că fiecare celulă cu conuri va transmite influxul uoiei singure celule bipolare, iar aceasta unei singure celule multipolare, care, printr-un axon unic, va transmite în continuare comanda spre scoarța calcarină, încât particularitatea sinaptică a celulelor cu conuri stă la baza formării senzațiilor colorate atât de complexe, cu participarea activă a zoelor corticale implicate în văz.

19.9.5. SIMȚUL FORMELOR

Simțul formelor se referă la proprietatea analizatorului vizual de a distinge conturul obiectelor luminate sau colorate din mediul înconjurător. La nivelul foveei centralis, acest proces se produce cel mai bine, devenind total imperfect spre periferia retinei. La baza acestui simț stă densitatea receptorilor din retină și modul în care este alcătuită o unitate receptoare. În centrul maculei, la nivelul zonei foveale, secțiuni microscopice au pus în evidență prezența doar a celulelor cu conuri și dispariția aproape totală a celulelor straturi celulare din retină.

Pentru aprecierea cu mare finețe a formelor, este nevoie nu numai de receptori normali din punct de vedere fiziologic, ci și de proiectarea punctului de la nivelul scoarței calcarine, unde are loc discriminarea, analizarea și sintetizarea informațiilor primite. La nivelul scoarței vizuale, proiecția maculei este de aproximativ 10 000 de ori mai mare decât pe retină. În zona extramaculară crește grosimea receptorilor, apar celule cu bastonașe, la nivelul cărora discriminarea formelor se face tot mai imperfect, dar crește sensibilitatea la lumină. Se apreciază că retina periferică ar fi doar semnalizatoare, în timp ce retina centrală este analizatoare pentru culnare și formă.

În zona periferică a retinei, receptorii au dimensiuni mai mari și sunt mai puțin numeroși, iar unitățile receptoare sunt grupate „în ciorchine”. Neuronii scoarței calcarine s-au specializat în timp, prin antrenament, să primească anumiți stimuli vizuali de la nivelul retinei, încât, dacă pisicile nou-născute sunt ținute timp de trei luni de zile într-un mediu unde au posibilitatea să vadă numai bare verticale sau orizontale, neuronii lor corticali vor răspunde numai la orientarea stimulilor respectivi din spațiu.

Simțul postnatal al formelor în zona extramaculară se datorește perfecționării funcționale a unor câmpuri receptoare specializate pentru mărimea, forma, poziția și direcția sursei luminoase, zona extramaculară având, deci, un rol deosebit în localizarea spațială a obiectelor, în aprecierea stării lor de mișcare sau repaus.

19.9.6. SIMȚUL STEREOSCOPIC

Simțul stereoscopic se referă la capacitatea analizatorului vizual de a aprecia profunzimea obiectelor din mediul înconjurător, cu participarea nemijlocită a circuitelor neuronale din corpii geniculați externi și din cortex. La nivelul retinei, imaginea este doar bidimensională, iar scoarța calcarină aduce și a treia dimensiune – profunzimea.

Se știe că distanța interpupilară normală la adult este de 64 mm, încât același obiect va fi privit sub un alt unghi de către ochiul drept și de către cel stâng, astfel că diferența de detalii obținută de către un ochi și de către celălalt realizează pe cele două macule impresia de relief al obiectului privit.

În arta fotografică se folosește acest principiu prin fotografierea simultană a unui obiect cu două aparate de fotografiat, ale căror obiective se află la o distanță de 65 mm, obținându-se fotografia în relief – stereoscopică.

În simțul reliefului se impune vederea binoculară, care aduce neuronilor corticali date puțin diferite de la cei doi ochi, pe care apoi aceștia le convertesc într-o imagine compusă tridimensională.

Fuziunea imaginilor binoculare are la bază un proces morfo-funcțional înăscut, la care se impune adăugarea unei experiențe de viață, o autoînvățare în primii ani de existență. Nou-născutul nu are vedere stereoscopică pentru că macula sa nu funcționează, iar acuitatea vizuală este foarte slabă și nu se pot percepe diferențele de detaliu ale celor două imagini proiectate pe cele două retine. După vârsta de 4–5 ani, când acuitatea vizuală are o valoare de minimum 0,7–0,8, se pot observa aceste detalii, care vor fi sintetizate de către centri nervoși superiori.

Analizatorul vizual are specialitatea să aprecieze și distanțele, fie numai calitativ (un obiect este mai depărtat, altul mai apropiat), fie și cantitativ – apreciind în metri distanța ce separă examinatorul de obiectul privit (apreciere absolută). În aprecierea distanțelor relative, vederea binoculară joacă un rol important și mult mai puțin însemnat în aprecierea distanțelor absolute, în care intervine un proces mult mai complex de integrare și de memorare a unei experiențe vizuale anterioare, capabilă să aprecieze distanța prin comparație. În acest caz, participă și vederea monoculară, care apreciază profunzimea obiectului, dar incomplet.

Pentru aprecierea profunzimii obiectului, scoarța calcarină participă activ cu numeroasele sale conexiuni neuronale, analizând și sintetizând date primite de la receptori, privind mărimea aparentă a obiectelor, perspectiva, distribuția umbrelor și a luminilor, luminozitatea și tonalitatea cromatică, efortul de acomodare, cât și conturul obiectelor, care poate fi net sau estompat. Compunerea tuturor acestor date dă senzația de profunzime, destul de netă uneori, întâlnită în arta cinematografică și în televiziune. Persoana monoftalmă vede în relief destul de bine dacă afecțiunea sa este congenitală și mult mai imperfect dacă monoftalmia apare după un accident. În acest din urmă caz, se va vedea stereoscopic din ce în ce mai bine, se va aprecia tot mai perfect distanțele, prin antrenament, când intervine și adaptarea scoarței cerebrale la noile condiții, adică la informațiile venite doar pe un singur canal vizual.

19.9.7. ACOMODAREA OCULARĂ

Adaptarea la lumină. În funcție de intensitatea luminii, ochiul omului și al animalelor poate să-și adapteze sensibilitatea fotoreceptorilor de pe retină, modificând diametrul orificiului pupilar aflat în centrul irisului. Acest diafragm colorat împiedică apariția aberațiilor sferice și cromatice, nepermițând razelor luminoase să treacă prin zona periferică a cristalinului.

La iluminarea intensă, diametrul pupilei scade până la 1–2 mm și poate crește până la 8–9 mm în cazul expunerii ochiului la lumină slabă. Reducerea fantei pupilare (minză) în cazul luminii puternice se datorește contracției fibrelor circulare ale musculaturii iriene, în timp ce mărirea pupilei (midriază) se realizează prin contracția fibrelor musculare radiare din iris.

Timpul de excitare normală a retinei pentru vederea scotopică nu depășește 0,1 s, în timp ce pentru vederea fotopică acest timp este mai scurt – 0,33 s. În cazul acomodării la lumină, are loc fie o adaptare fotochimică a celulelor cu conuri și bastonașe față de intensitatea stimulului luminos, fie este vorba de o scurtare evidentă a timpului de excitare normală a fotoreceptorilor. Conurile se adaptează mai repede la întuneric, pentru că au posibilitatea să-și sintetizeze mai rapid pigmenții fotosensibili. Ca urmare, în primele minute, în mediul întunecos sensibilitatea conurilor crește de 20–50 de ori și se observă obiectele total neclare. Rămânerea în continuare în mediul fără lumină atrage și adaptarea bastonașelor, proces mai lent dar mai eficace, deoarece, după aproximativ 40 de minute, sensibilitatea bastonașelor a crescut de 15 000 de ori și se pot observa și detaliile obiectelor (viteza de sinteză a fotopigmentului este mai redusă) (fig. 19.37).

În adaptarea la lumină, procesele biocimice se desfășoară într-un interval mai scurt (3–4 minute), pentru că rodopsina bastonașelor se decolorează rapid, încât adaptarea se realizează numai pe seama conurilor, care își sintetizează fotopigmentul cu viteză mult mai mare. Un rol deosebit de important în adaptarea la lumină și la întuneric îl are și expunerea anterioară a retinei la lumină.

Expunerea de lungă durată la lumină intensă va distruge fotopigmentul, câteodată până la vitamina A, resinteza retinului din vitamina A fiind un proces lent și necesitând un timp mai lung de adaptare. În cazul adaptării la lumină și în întuneric, ochiul are o mare „plasticitate”, putând să-și modifice sensibilitatea de aproximativ un milion de ori, deși sunt situații în care retina nu se poate adapta perfect la iluminarea intensă sau la întuneric.

Dacă intrăm într-o cameră întunecată venind de la lumina intensă a soarelui nu percepem nici măcar punctele luminoase ale obiectelor, exact la fel ca atunci când intrăm într-o încăpăre cu luminozitate intensă venind dintr-un mediu foarte întunecat. În acest caz, punctele întunecate ale obiectelor ne par extrem de strălucitoare și vedem imaginea acestora fără contur precis, necesitând contrastele.

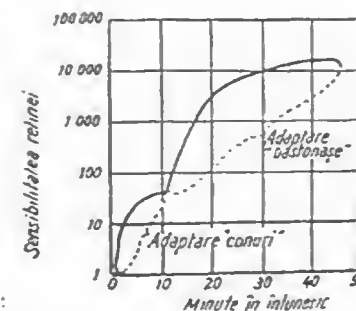


Fig. 19.37. Adaptarea la întuneric a celulelor cu conuri și cu bastonașe.

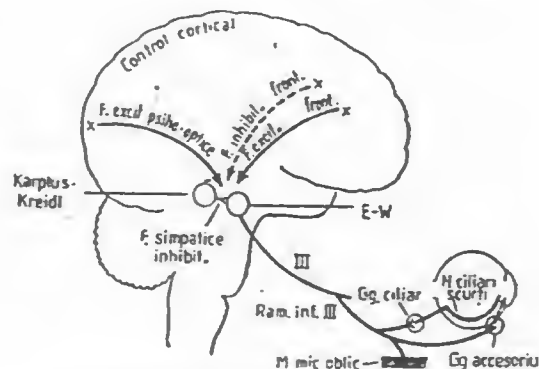


Fig. 19.38. Arcul reflex parasimpatic iridoconstrictor.

În timpul miozei se adâncește focarul ocular, reducându-se cercurile de difuziune la nivel retinian, iar imaginea din axul ochiului devine mai clară. Jocul pupilei este comandat de contracția și relaxarea fibrelor musculare iriene aflate permanent sub controlul inervației simpatico-parasimpatice. Dacă parasimpaticul produce iridoconstricție și mioză, simpaticul va realiza midriază, prin contracția fibrelor radiare, dar, în același timp, va exercita și efect inhibitor asupra centrului pupilar parasimpatic (zona anterioară a nucleului Edinger-Westphal din mezencefal).

Calea eferentă va avea traiectul nervului oculomotor comun și de aici în ganglionul ciliar. Fibrele postganglionare parasimpatice merg pe calea nervilor scurți ciliari, traversează sclerotică și, în spațiul supra-coroidian, vor forma plexuri de anastomoză pe fața externă a corpului ciliar, de unde pleacă ramuri pentru mușchiul ciliar, sfincterul pupilar și corneea (fig. 19.38).

Relaxarea pupilară este comandată de inervația simpatică, reprezentată de centrul hipotalamic Karplus și Kreidl din planșeul ventriculului III, centrul pontin Babinski-Nageotte, centrul bulbar cilio-spinal Budge, grupe de celule din tractul intermedio-lateral, dispuse de la punte pe toată măduva cervicală, cât și de la centrul cilio-spinal Budge-Waller (C₆-D₁).

Fibrele simpatică părăsesc măduva și, prin ramurile comunicante albe, ajung la ganglionul cervical superior, unde fac sinapsă, traversând apoi fără sinapsă ganglionii cervicali mijlociu și inferior (fig. 19.39). Fibrele postganglionare amielinice vor ajunge mai întâi la plexul pericarotidian, la cel cavernos, la ganglionul Gasser, apoi, pe calea nervilor oftalmic, nazal și prin nervii ciliari lungi, la mușchiul pupilodilatator. La animalele inferioare, deși se secționează conexiunile irisului cu sistemul nervos central, pupila este sensibilă la lumină, dovedind existența unor centri comandanți autonomi în structura iriană.

Scoarța cerebrală influențează evident jocul pupilar. Dacă se excită o zonă senzitivă corticală, se obține midriază, în timp ce excitația unei zone motorii realizează mioză, după cum și filetele iridodilatatoare împrumută calea unui nerv senzitiv, iar cele iridoconstrictoare a unui nerv motor.

Tonusul centrului dilatator este menținut prin intervenția întregului sistem senzitivo-senzorial și al celui psihic afectiv, iar al centrului iridoconstrictor, prin întreg sistemul proprioceptiv, prin sensibilitatea musculară și cea labirintică.

Midriaza care acompaniază stările de șoc emoțional se datorește inhibării centrului constrictor și mai puțin contracției fibrelor radiare din iris.

În timpul narcozei profunde și al somnului, această acțiune inhibitoare dispare și pupila va deveni miotică.

Mediația chimică a miozei și midriazei se realizează prin acetilcolină și, respectiv, prin noradrenalină, dar trebuie să amintim și capacitatea irisului de a sintetiza prostaglandine cu rol de modulatori ai transmisiei

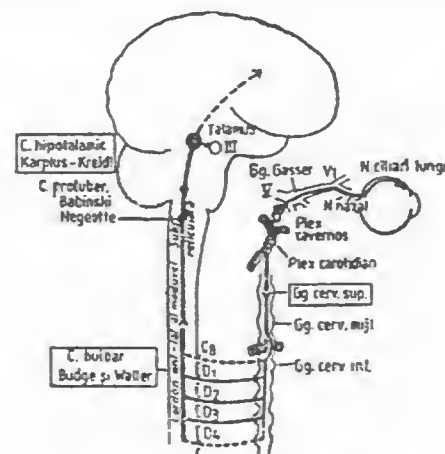


Fig. 19.39. Arcul reflex simpatic iridodilatator.

sinaptice. Prostaglandinele vor avea efect opus noradrenalinei, producând vasodilatație și secreție crescută de umoare apoasă. Injectate în camera anterioară, prostaglandinele realizează mioză rezistentă la atropină.

Reflexul fotomotor se studiază în semiobscuritate, subiectul fixând un obiect îndepărtat. Proiectând asupra ochiului un fascicul luminos, se observă micșorarea rapidă și amplă a pupilei, care va persista atâta vreme cât va acționa fasciculul de lumină, după care se observă midriaza. Este vorba de reflexul fotomotor direct, iar pupilograma poate înregistra exact fazele contracției și relaxării musculaturii iriene. Acest reflex există de la naștere, dar spre bătrânețe diminuează, datorită sclerozării țesutului irian. Întreaga retină declanșează reflexul fotomotor, dar macula este regiunea care dă răspunsul cel mai energic la lumina diurnă.

Intensitatea reflexului fotomotor depinde de calitatea luminii și de bruscărea aplicării stimulului luminos, pentru că aplicarea acestuia în mod progresiv realizează adaptarea retinei la lumină, iar reflexul fotomotor apare slab reprezentat, ca și în cazul oboselii pupilare din cursul excitației succesive și prelungite a retinei. Iluminarea unei singure retine produce răspuns pupilar și din partea celuilalt ochi (reflex fotomotor consensual), explicat prin existența fasciculului direct și încrucișat al ultimului neuron al căii aferente pupilomotorii.

Calea aferentă a reflexului fotomotor este reprezentată de nervul optic, care culege informații de la receptorii retinieni (bastonașe și conuri). Fibrele pupilare parcurg bandeleta optică, pe care o părăsesc înaintea sinapsei cu corpul geniculat lateral din metatalamus, ajungând în brațul conjunctiv al anterior alături de fibrele fasciculului retino-tectal.

Înainte de a ajunge la tuberculii cvadrigemeni anteriori, fibrele pupilomotorii se detașează și ajung în zona pretectală, făcând sinapsă cu nucleul pretectal. După această sinapsă, fibrele ajung în nucleii Edinger-Westphal, în special la cel de partea opusă, cât și la centrul hipotalamic pupilodilatator.

Calea eferentă este comună cu cea constrictoare, deja descrisă.

În cazul afectării căii eferente simpatică apare sindromul Horner, tradus prin mioză de partea leziunii, vasodilatație și enoftalmie (căderea pleoapei superioare, cu micșorarea fantei palpebrale).

Distrușgerea ambilor nervi optici duce la pierderea reflexului fotomotor, cât și al celui de acomodare la distanță, în timp ce leziunea corpului geniculat lateral, iradiațiile optice sau ale cortexului occipital nu modifică reflexul fotomotor.

Pentru vederea de aproape, pupila își micșorează, de asemenea, diametrul, dar cu o viteză mult mai mică decât în cazul răspunsului fotomotor. Este vorba și de acomodare-convergență, contracția pupilară însoțindu-se în acest caz și de o ușoară descentrare nazală a pupilei.

Mai întâi apare o acomodare pentru punerea la punct a imaginii pe retină, după care urmează convergența globilor oculari pentru fuziunea imaginilor retiniene, urmată de mioza propriu-zisă, ce reduce aberația dată de modificarea curburii cristalinului.

Toate aceste fenomene care se succed în cazul privirii de aproape a unui obiect sunt sub control parasimpatic.

Fibrele eferente ale răspunsului pupilar în vederea de aproape părăsesc traiectul nervului III înaintea ganglionului ciliar, făcând sinapsă în ganglionul accesoriu Axenfeld.

Se constată, de asemenea, mioză în timpul contracției orbicularului pleoapelor, cu puoc de plecare în proprioceptorii de la acest nivel, după cum apare și midriază în abducția globului ocular sau mioză în adducția sa (contracția mușchilor drept intern se asociază cu mioză, iar a mușchilor drept extern cu midriază). Toate senzațiile puternice olfactive, tactile, auditive, gustative realizează midriază bilaterală, cu punct de plecare cortical, ca și în stările afective (frică, mânie, bucurie), în care un rol important revine diencefalului, în special talamusului și sistemului limbic.

Adaptarea la distanță. Pentru a vedea obiectele apropiate sau depărtate intervine, de asemenea, acomodarea ochiului, dar de această dată cu participarea eficientă a cristalinului.

Ca să avem o imagine clară a obiectelor apropiate, ligamentele suspensoare ale cristalinului sunt relaxate, cu contracția mușchilor ciliari, ceea ce permite reducerea razei cristalinului, fenomen cu atât mai evident, cu cât obiectul este mai apropiat de ochi (fig. 19.40).

Acomodația este proprietatea cristalinului de a-și modifica raza de curbura, cu scopul ca un obiect privit să aibă o imagine clară pe retină când se deplasează între punctul proximal și remotum.

Acomodarea se realizează prin creșterea curburii feței anterioare a cristalinului și mai puțin a celei posterioare. Rolul cristalinului în acomodare se poate demonstra cu ajutorul imaginilor Purkinje.

Sursa luminoasă plasată în fața ochilor la 30–50 cm va produce trei imagini: prima imagine este mare, dreaptă, luminoasă, produsă de fața anterioară a corneei; a doua imagine – mai mare, dreaptă, mai puțin luminoasă, este dată de fața anterioară a cristalinului, iar cea de a treia imagine – mai mică și răsturnată, produsă de fața posterioară a cristalinului.

Dacă subiectul va privi un obiect apropiat, cea de a doua imagine se micșorează mult, datorită creșterii curburii feței anterioare a cristalinului, când straturile sale corticale alunecă în jurul nucleului central, iar partea centrală va căpăta aspectul de pară, cu creșterea puterii sale de refracție.

În cursul acomodăției apar modificări caracteristice și la nivelul zonulei Zinn și al proceselor ciliare. Zonula se relaxează, iar distanța dintre marginea sclerală și circumferința cristalinului se mărește. Atropina instilată în sacul conjunctival va întinde fibrele zonulare (blochează parasimpaticul), în timp ce ezerina (inhibitor al colinesterazei) le relaxează. Mușchiul ciliar realizează modificările cristalinului în cursul acomodăției. Acest mușchi este format din două porțiuni distincte, una cu dispoziție circulară, numită și sfîcter ciliar, înervată de parasimpatic, și altă porțiune cu orientare radială, numită tensorul coroidei, înervată de simpatic. Fibrele circulare au rol în acomodăția proximală, iar fibrele radiale intervin în acomodăția distală. Miopul nu utilizează acomodăția și va avea zona circulară a acestui mușchi mai slab reprezentată, comparativ cu a emetropului. Din puoc de vedere filogenetic, acomodăția distală a apărut mai devreme decât cea proximală, motiv pentru care fibrele radiale se dezvoltă în viața embrionară înaintea celor circulare. Acomodația este un proces reflex. Calea sa aferentă este reprezentată de nervul optic și poate avea un traiect scurt, prin nervul optic, bandelele optice, regiunea pretectală și, de aici, prin bifurcare, la cei doi nuclei Edinger–Westphal.

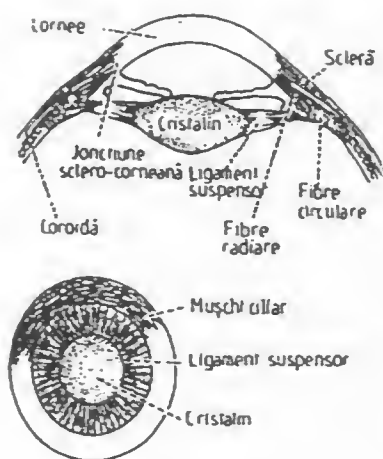


Fig. 19.40. Adaptarea la distanță.

Traiectul lung duce impulsul până la zona calcarină din lobul occipital, unde are loc decodificarea informației.

Acomodația este un reflex condiționat câștigat prin autoînvățare, evident după vârsta de doi ani, adică după ce funcția maculară se dezvoltă. Calea eferentă a acomodăției proximale este parasimpatică, ajungând în celulele de talie mică din zona posterioară a nucleului mezencefalic, care constituie centrul propriu-zis al acomodăției, deoarece partea anterioară a acestui nucleu reprezintă centrul iridoconstrictor. Pe calea nervului III, influxul ajunge la ganglionul ciliar și, prin nervii ciliari scurți, la zona circulară a mușchilor ciliari. Atropina blochează acomodăția proximală, iar ezerina o prelungește.

Calea eferentă a acomodăției distale este simpatică, cu punct de plecare în zona hipotalamică, după care, pe simpaticul cervical, la ganglionul cervical superior și, de aici, prin plexul pericarotidian, ganglionul Gasser, ramul oftalmic al trigemenului, nervul oazal și nervii ciliari lungi, spre zona radială a mușchilor ciliari. Receptorul este de tip β_2 -adrenergic, iar mediatorul chimic – noradrenalina. Deoarece nervii ciliari scurți au cronaxia mai mică decât cei lungi, viteza de acomodare este mai mare pentru acomodăția proximală. Acomodația proximală se asociază și cu convergența globilor oculari. La baza reflexului de convergență stă reflexul de fixație maculară, care apare spre vârsta de 6 ani, prin dezvoltarea vederii binoculare și prin intervenția zonelor superioare de coordonare și învățare.

Miopul acomodează mai puțin decât emetropul, iar hipermetropul acomodează cel mai mult. Oboseala generală, insomnia și anoxia prelungită diminuează capacitatea de acomodare.

Punctul remotum corespunde celei mai mari distanțe la care ochiul vede clar un obiect, iar **punctul proximal** – punctul cel mai apropiat de ochi la care un obiect se vede clar. Punctul proximal se află la o distanță de 10 cm față de corneă, iar după vârsta de 75 de ani se confundă cu punctul remotum situat la infinit. Miopul va avea punctul proximal mai apropiat de ochi decât emetropul, iar hipermetropul îl va avea mai depărtat. Distanța dintre punctul proximal și remotum, exprimată în metri, poartă numele de **parcursul acomodăției**, iar modificările refracției oculare, exprimate în dioptrii, reprezintă **amplitudinea acomodativă**. Aprecierea acomodăției se poate realiza cu refractometrul sau cu testul Duane, care apreciază distanța de ochi la care două linii cu lungimea de 3 mm și grosimea de 0,2 mm desenate pe o hârtie albă vor fi văzute contopite; se determină astfel punctul proximal al ochiului.

19.10. ANALIZATORUL GUSTATIV

19.10.1. PARTICULARITĂȚI STRUCTURALE

Segmentul periferic al analizatorului gustativ este reprezentat de mugurele gustativ, care conține receptori gustativi, reprezentați de celule specifice, ce iau naștere în mod permanent prin diviziunea mitotică a celulelor epiteliale de susținere din jurul acestora. Mugurele gustativ va conține, deci, atât celule senzoriale tinere, cât și mature, a căror perioadă de existență variază între 10–12 zile.

Suprafața limbii este brăzdată de creste, care nu sunt altceva decât papile gustative ce conțin muguri gustativi.

Se descriu patru categorii de papile, și anume:

- **papile circumvalate** sau **caliciforme**, în număr de 7–12, ce formează „V”-ul lingual, prezente pe fața dorsală a limbii;
- **papile foliate**, dispuse pe marginile limbii și în zona sa posterioară, mai numeroase la copii;
- **papile fungiforme**, în număr de 150–200, cu diametrul mic;
- **papile filiforme**, plasate, ca și cele fungiforme, difuz pe fața dorsală a limbii.

Papilele gustative, cu excepția celor filiforme, prezintă muguri gustativi, plasați în pereții șanțului care circumscrie zona centrală a papilelor circumvalate, fie pe suprafața lor superioară, cum este cazul papilelor fungiforme. Papilele filiforme nu conțin muguri gustativi, dar, având bogate terminații nervoase care le înconjură, prezintă un rol mecanic deosebit.

La baza papilelor circumvalate și foliate sunt prezente glande, în a căror secreție se va dizolva și dilua substanța sapidă, după cum vor participa și la îndepărtarea microbilor și a reziduurilor alimentare din papile.

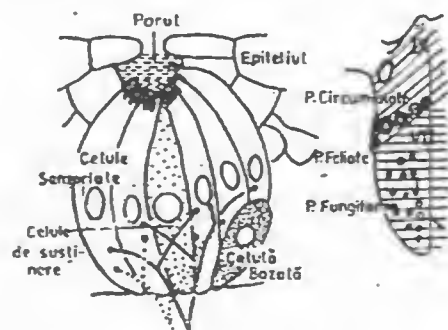


Fig. 19.41. Mugurele gustative.
Distribuția papilelor pe limbă.

Mugurele gustative are un diametru de 1/30 mm (33 μ m) și o înălțime de 1/16 mm (62,5 μ m), conținând aproximativ 40–50 de celule, grupate în celule senzoriale, bazale și de susținere (fig. 19.41).

Celulele senzoriale au o formă alungită și efilată spre capete. Polul gustativ al acestor celule prezintă prelungiri, sub formă de cili scurți și subțiri (microvili), cu lungimea de 2–3 μ m și lățimea de 0,2 μ m, ce ies prin porul gustativ la suprafața limbii.

Polul opus al celulei este inserat pe membrana bazală a epitelului, fiind înconjurat de fibre senzitive și motorii, cu care realizează sinapse. Dacă aceste fibre se secționează, celulele senzoriale gustative degenerază, dovedind existența unui factor trofic proteic la capătul terminațiilor nervoase cu tropism spre celulă.

Spre deosebire de celulele senzoriale, cele de susținere sunt mai lente, cu o formă de semilună, situate în jurul mugurelui gustativ.

Metode moderne de histoenzimologie au pus în evidență faptul că mugurele gustative conțin un singur tip de celule în stadii diferite de maturizare și funcționare, deoarece, din punct de vedere metabolic, aceste celule nu se diferențiază.

Mugurii gustativi sunt răspândiți neuniform pe suprafața limbii. Cei mai mulți se găsesc în celulele circumvalate și formează „V”-ul lingual. Un număr mai mic se găsește în papilele fungiforme din zona ventrală a limbii, cât și în cele foliate aflate în special pe zona postero-laterală linguală. Se mai găsesc, de asemenea, muguri gustativi răspândiți pe zona palatului moale, pe pilierii amigdalieni, în zona nazofaringiană, pe epiglotă, faringe și în zona superioară a laringelui.

Adulții posedă aproximativ 10 000 de muguri gustativi, iar copiii – ceva mai mult. După vârsta de 45 de ani, mugurii gustativi degenerază, ceea ce explică reducerea senzației gustative cu vârsta.

Gusturile fundamentale sunt sesizate diferențiat de către mugurii gustativi. Gustul dulce se percepe în special în zona anterioară a limbii, acru și sărat – în zonele laterale linguale, iar gustul amar la nivelul papilelor circumvalate de pe zona posterioară a limbii. Mugurii gustativi răspund la toate cele patru gusturi primare, dar au posibilitatea să răspundă, de exemplu, mai mult la acru și sărat sau mai mult la dulce și amar, ceea ce explică perceperea mai bună a acestor gusturi în anumite zone ale limbii, unde se găsesc în proporție mai mare mugurii respectivi.

19.10.2. STIMULAREA MUGURELUI GUSTATIV

Ca și la alte celule senzoriale receptoare, membrana celulelor gustative este electronegativă la interior și pozitivă la exterior. În momentul în care se aplică substanța gustativă pe microvilul mugurelui gustativ are loc o ușoară scădere a potențialului de membrană, aproximativ proporțională cu logaritmul concentrației substanței gustative excitatoare. Această modificare a potențialului membranal constituie, în realitate,

potențialul de receptor al celulelor gustative, al cărui mecanism de producere rămâne încă neclar. Se presupune că substanța gustativă este absorbită pe suprafața cilului gustativ, fenomen care modifică proprietățile fizice ale membranei cilului, probabil, în primul rând, permeabilitatea față de ioni, producându-se depolarizarea membranală. Fiecare substanță gustativă va produce modificări diferite în proprietățile fizice ale membranei cilului gustativ, încât și răspunsul va fi diferențiat. Este vorba de o interacțiune moleculară a substanței sapide cu membrana receptorului, adică un fenomen mai mult chimic, decât electrostatic.

În formarea potențialului receptor se aduc în discuție nu numai modificarea potențialului de membrană al celulelor gustative, ci și viteza de deplasare a ionilor, ceea ce determină specificitatea răspunsului gustativ. La viteze egale de deplasare a cationilor și anionilor, substanța respectivă nu are gust sau are un gust amar (ClK, BrK, KClO₃).

Dacă viteza anionilor este mai mare, gustul va fi sărat (ClNa, BrNa, INa), iar, dacă aceasta va fi foarte mare, gustul substanței va fi dulce (ClLi, BrLi, ILi); în cazul în care crește viteza cationilor apare gustul acru (acetat de Na, acetat de K, soluții de acizi). Alți cercetători aduc în discuție prezența pe membrana celulelor gustative receptoare a unor proteine specifice diferite pentru fiecare senzație gustativă.

S-au izolat, astfel, proteine receptoare pentru substanțele dulci, care pot fi blocate de cocaină, cât și pentru cele acre și amare. În acest fel, se încearcă explicarea apariției senzațiilor gustative, deși încă nu sunt date concludente.

Rezultatele experimentale se completează reciproc, pentru că la baza formării gustului stă, pe de o parte, absorbția substanței sapide pe membrana celulei senzoriale, dar, în același timp, are loc o legare labilă a acesteia cu componentele membranare care, în final, va realiza tot modificări ale permeabilității membranei pentru ioni.

Inhibarea specifică a unui sau altuia din gusturi, prin blocarea receptorilor colinergici după curarizare, arată că în formarea potențialului receptor gustativ are un rol deosebit interacțiunea moleculară dintre substanța sapidă și proteina specifică de pe membrana celulei gustative. De asemenea, se discută și rolul filetelor nervoase trofice ale celulelor gustative, ce ar realiza o hiperpolarizare membranală, deci un fel de „rezistență” față de stimulii gustativi.

Diametrul polului mugurelui gustativ are un rol deosebit în formarea senzației gustative. Sub influența substanței solvate apar modificări spațiale ale conformației membranei papilelor, ceea ce va determina schimbarea dimensiunilor porului gustativ. Așa, spre exemplu, s-a putut demonstra că grupările tiol realizează contracția porului, în timp ce ionii de cupru, nichel și zinc produc dilatarea acestuia.

19.10.3. TRANSMISIA IMPULSURILOR GUSTATIVE

Fibrele aferente ale mugurelui gustativ sunt la origine amielinizate și vor forma în interiorul celulelor receptoare plexul intragemal, care sub membrana bazală va da naștere plexului subgemal, iar la periferia mugurelui, plexurilor perigemale. Fibrele care părăsesc mugurele gustative devin mielinizate și vor forma nervii gustativi.

Prin nervul coarda timpanului – ram din facial – impulsurile gustative sunt culese din zona celor 2/3 anterioare ale limbii, iar prin nervul glosofaringian, din 1/3 posterioară a limbii. Primul neuron al căii gustative este reprezentat de ganglionul geniculat, pentru coarda timpanului, și de ganglionul Andersch și Ehrenritter, pentru glosofaringian. De la acești ganglioni, impulsurile gustative sunt conduse spre cel de-al doilea neuron, situat în nucleul tractului solitar din bulb. Tot la acest nivel ajung pe calea nervului vag și impulsurile gustative de la baza limbii, faringe, palatul moale, epiglotă și laringe. Fibrele nervoase ale căii gustative care părăsesc nucleul tractului solitar trec de partea opusă și urcă pe calea lemniscului medial (banda Reil mediană) până la al treilea neuron al căii, reprezentat de nucleul dorsal postero-medial din talamus.

Proiecția corticală este localizată în zona inferioară a circumvoluției parietale ascendente (zona operculară a lobului insulei – aria 43), în apropierea centrilor motori ai limbii, ai musculaturii masticatorii și ai deglutiției (fig. 19.42). Din tractul solitar, un număr mare de impulsuri ajunge direct la nucleii salivatori superiori și inferiori, de unde se transmit comenzi secretoare pentru glandele parotide pe calea nervului

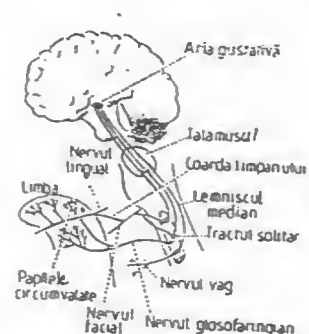


Fig. 19.42. Segmentul intermediar și proiecția corticală a sensibilității gustative.

19.10.4. EXCITANȚII RECEPTORILOR GUSTATIVI

Nu toate substanțele pot fi excitanti gustativi. Din acest punct de vedere, densem substanțe cu gust, sau sapide, și substanțe fără gust, sau insipide. Datorită unei anumite structuri chimice, o substanță poate crea o anumită senzație gustativă sau nu o creează deloc.

Substanțele acide sunt acide iar intensitatea senzației gustative de acid este proporțională cu logaritmul concentrației ionilor de hidrogen din compoziția substanței respective.

Gustul sărat este produs de către sărurile ionizabile, dar calitatea senzației gustative de sărat diferă de la o sare la alta. Cationii sărurilor sunt cei care dau senzația de sărat, iar anionii participă într-o măsură mai mică.

Gustul dulce nu este produs numai de o singură categorie de substanțe chimice, ci se includ aici zaharurile, glicolii, alcoolii, alchidele, cetonele, amidele, esterii, acizii aminați, acizii sulfonați, acizii halogenați, sărurile anorganice de plumb și beriliu.

Gustul amar, ca și cel dulce, este produs de o serie întreagă de substanțe chimice organice. Alcaloizii sunt cei mai importanți stimuli pentru amar și includ droguri folosite în practica medicală, cum ar fi chinina, cafeina, stricnina, nicotina.

Există substanțe care, pentru moment, lasă senzația de dulce, ca mai târziu să producă senzația de amar, este cazul zaharinei – folosită mult de către diabetici. Dacă substanțele amare se găsesc în concentrație crescută în alimente, atât omul, cât și animalul le refuză. Gustul amar este produs de către alcaloizii prezenți în plantele otrăvitoare, încât ajută la selectarea acestora pentru alimentație, constituind gustul de protecție al omului și animalelor. De altfel, sensibilitatea gustativă pentru amar este foarte ridicată comparativ cu celelalte gusturi. Astfel, dacă gustul acru al acidului hidrocloic se percepe la o concentrație de 0,0009 N, cel sărat pentru ClNa la 0,01 M, cel dulce pentru sucroză la 0,01 M, pentru chinină pragul gustativ este de 0,00008 M.

De asemenea, trebuie amintit și faptul că în sesizarea unui gust are importanță deosebită și componența afectivă. Ca o substanță să poată avea un gust, ea trebuie să se dizolve, deși nu toate substanțele solubile sunt sapide.

Saliva este principalul solvent pentru substanțele sapide, pe care le și diluează dacă concentrația lor este prea mare, alături de mișcările limbii, care ajută la dizolvarea mai rapidă în salivă a substanței gustative, realizând, în același timp, și răspândirea acesteia pe toată suprafața receptoare gustativă.

glosfaringian (de la nucleul salivar inferior din bulb) și pe calea nervului facial (de la nucleul salivar superior din punte) pentru glandele submandibulare și sublinguale. Pe aceste căi reflexe se va realiza secreția salivară din timpul ingestiei de alimente, necesară digestiei bucale. De asemenea, de la nivelul tractului solitar pleacă și ramuri colaterale spre nucleul reticulat al formațiunii reticulate, de unde, pe calea tractului reticulo-bulbar, ajung fibre atât spre glandele salivare, cât și la mușchii pieșoi ai feței, la mușchii masticatori, la mușchii ce intervin în deglutiție și cei motori ai limbii, cu scopul coordonării mișcărilor asociate senzațiilor gustative. În transmiterea excitației gustative fiecare fibră nervoasă colectează informațiile de la mai multe celule gustative, după cum poate răspunde la mai mulți excitanti gustativi cu calități diferite.

Sub influența stimulului gustativ, fibrele nervoase gustative generează micropotențiale de acțiune, în special în primele 2-3 s de stimulare, după care frecvența lor scade, dar se păstrează la un nivel constant, proporțional cu concentrația și calitatea stimulului gustativ, producând, la o concentrație normală, descărcări prelungite în fibrele gustative.

19.10.5. SENZAȚIA GUSTATIVĂ

La apariția senzațiilor gustative participă o serie întreagă de fenomene senzoriale secundare, deoarece la conștientizarea gustului iau parte atât sensibilitățile olfactive, tactile, termică și dureroasă ale zonei gustative, cât și sensibilitatea proprioceptivă a mușchilor masticatori și linguali. Gustul apare ca o rezultantă a informațiilor percepute pe mai multe căi, cu scopul definirii cât mai complete a calităților chimice și fizice ale obiectului introdus în cavitatea bucală.

Apariția unei anumite senzații gustative diferă după sensibilitatea respectivă, fiind maximă pentru amar și minimă pentru sărat, după cum diferă și după zona excitată a limbii, știind că sensibilitatea gustativă se reduce de la vârful spre baza limbii. Sunt situații în care senzația gustativă persistă și după îndepărtarea stimulului respectiv, fenomen explicat prin participarea zonelor centrale nervoase la activitatea celei receptoare. Este cazul persistenței senzației de amar chiar după clătirea îndelungată a cavității bucale după chinină sau accentuarea acestei senzații la proiectarea limbii în afara cavității bucale. De asemenea, prin masticarea unei substanțe amare, senzația gustativă este mai diminuată, probabil prin apariția unei inhibiții de stingere în centrul gustativ cortical, produsă de activarea altor centri din jur, cu punct de plecare proprio- și exteroceptorii antronați în masticare. Persistența senzației gustative după îndepărtarea excitantului corespunzător nu se mai întâlnește în cazul leziunilor diverselor etaje ale segmentului intermediar gustativ, sau al celui cortical, după cum persistența senzației este mult crescută la persoanele cu disfuncții cortico-subcorticeale.

Senzațiile gustative pot fi considerate atât ca *senzații de bază* (dulce, amar, sărat și acru), produse de substanțe pure ce acționează izolat, cât și ca *senzații mixte*, produse de amestecarea substanțelor de bază. Dacă se excită receptorul gustativ cu un excitant neadecvat, cum ar fi curentul electric, se poate obține o *senzație gustativă nespecifică*.

Există o multitudine de senzații gustative realizate prin combinarea celor patru senzații fundamentale cu senzațiile tactile, olfactive sau dureroase.

Cercetătorii au încercat să clasifice substanțele sapide după structura chimică, după greutatea moleculară, după gradul de solubilitate, dar nu s-au obținut rezultate prea concludente. Totuși, se poate admite că ionul de hidrogen este caracteristic gustului acru, deși nu există un paralelism între concentrația acestui ion și intensitatea gustului respectiv. Este cert faptul că nu numai structura chimică, ci și greutatea moleculară influențează gustul, și anume substanțele cu mase moleculare mici vor fi sărate sau dulci, în timp ce substanțele cu greutate moleculară mai mare realizează gustul de amar. Cele cu greutate moleculară mult prea mare nu se pot dizolva și, deci, nu produc nici o senzație. Sunt situații în care senzațiile gustative pot avea modificări cantitative constând în scăderea (hipogeuzie) până la dispariție a gustului (ageuzie), care pot fi genetice sau dobândite, prin lezarea unor zone din segmentul intermediar de conducere sau a zonei centrale corticale.

Pot exista, de asemenea, modificări calitative (disgeuzie și parageuzie), atunci când se confundă senzațiile gustative, cum ar fi cazul unor intoxicații sau al unor dereglări endocrine. În halucinațiile gustative, subiectul realizează o senzație gustativă ce apare în lipsa unui stimul gustativ corespunzător – cum ar fi cazul unor afecțiuni ale sistemului nervos central.

Henning imaginează „prisma gusturilor”, în care fiecare unghi reprezintă un gust fundamental, iar laturile prismei – o combinație a celor două gusturi vecine; fiecare punct din interiorul prismei va fi o rezultantă a gusturilor fundamentale.

Pragul gustativ reprezintă concentrația minimă a substanței solvite pentru a produce senzația gustativă minimală. Pragul gustativ diferă în funcție de o serie de factori, printre care suprafața de stimulare, temperatura substanței gustative (optimă pentru soluții la 30-40°C), influența luminii (sensibilitatea gustativă scade la întuneric), prezența senzației de foame, știind că foamea scade pragul pentru dulce și sărat, în timp ce crește cel pentru amar. De asemenea, pragul gustului depinde și de o serie de factori psihologici, de starea de odihnă sau oboseală nervoasă, după cum poate suferi variații în faza gravidității. Pentru alegerea alimentelor participă și analizatorul olfactiv care, împreună cu cel gustativ, dă posibilitate omului și animalelor să se hrănească corespunzător și să-și asigure secreția fiziologică a sucurilor digestive. Experimental s-a constatat că animalul își alege alimentele după necesitățile organismului, prin intermediul

analizatorului gustativ. Astfel, un animal adrenalectomizat va prefera apa sărată celei cu concentrație normală de clorură de sodiu. Cel paratiroidectomizat va alege apa cu mai multă clorură de calciu, în timp ce animalul injectat cu cantități mari de insulină își va alege alimentele dulci pentru hrană. Preferința pentru un gust sau altul este rezultatul unor procese nervoase centrale, și nu periferice, de la nivelul mugurelui gustativ, pentru că o serie întreagă de experimente pe animal au arătat că preferința gustativă poate fi produsă la animal chiar în absența modificărilor incluse în mugurele gustativ de către substanța respectivă. Preferința gustativă este, de asemenea, dominată de realizarea plăcerii sau neplăcerii față de substanța ingerată. Dacă o persoană se îmbolnăvește după consumul unui aliment, va avea imediat o aversiune pentru alimentul respectiv, care îi va crea neplăcere ori de câte ori îl va consuma sau numai îl va vedea. Prin antrenament poate crește sensibilitatea gustativă, încât se poate ajunge la o discriminare perfectă a gusturilor apropiate. Este cazul degustătorilor de vinuri și, în general, al persoanelor cu un deosebit rafinament alimentar.

În toate aceste cazuri, este vorba și de contrastul gustativ simultan sau succesiv, când se remarcă doar unul din cele patru gusturi fundamentale amestecate. Această calitate a recepției gustative este probabil completată de o funcționare perfectă a tuturor segmentelor analizatorului, în primul rând a zonei de proiecție corticală.

19.10.6. ADAPTAREA GUSTATIVĂ

Adaptarea gustativă apare atunci când stimulul gustativ acționează un timp îndelungat asupra receptorului. Prin mișcările limbii, prin cele de supt și de masticatie se stimulează și alți receptori gustativi încă neadaptați. Dacă se produce stimularea progresivă și constantă a receptorilor gustativi, se observă o reducere a capacității funcționale prin apariția fenomenului de adaptare. Adaptarea este invers proporțională cu intensitatea și viteza cu care excitantul se răspândește pe suprafața limbii; orice modificare a intensității stimulului scade adaptarea pentru o anumită perioadă de timp, dar aceasta re apare la un nou stimul gustativ. Sub acțiunea prelungită a unui stimul, sensibilitatea gustativă poate diminua până la dispariție, fenomen care apare mai rapid pentru substanțele dulci și sărate.

În cadrul adaptării, sensibilitatea gustativă scade numai în raport cu categoria de stimuli aplicați și persistă sau se intensifică pentru ceilalți stimuli gustativi. După adaptare, restabilirea sensibilității gustative este evidentă, în special pentru gustul sărat și mai greu pentru cel amar. Adaptarea la periferia analizatorilor gustativi este legată atât de instalarea potențialului de receptor, cât și de mecanismul transmiterii acestuia spre dendrita primului neuron.

Procesele centrale ale adaptării sunt mai complexe și, probabil, legate de mecanismele electro-chimice ale repolarizării neuronilor din întregul circuit cortico-cortical și talamo-cortical de activare a zonei gustative.

19.10.7. EXPLORAREA GUSTATIVĂ

Oferind indicații deosebite în diferite boli, conturând aptitudini profesionale ale degustătorilor de vinuri și alimente, metodologia investigării gustului s-a dezvoltat progresiv. Se pot investiga papilele gustative izolate, diverse regiuni ale limbii sau întreaga sa suprafață.

Explorarea gustativă urmărește integritatea segmentului periferic al analizatorului, integritatea căilor de conducere și a centrilor corticali gustativi, apreciind existența senzației gustative, modul de răspuns la excitanții specifici, absența gustului în zona cercetată.

Metodele utilizate pentru investigarea gustului diferă după stimulul folosit: soluții apoase; substanțe solide sau gelatinoase; substanțe volatile; curent electric etc.

Utilizarea *soluțiilor apoase* pentru aprecierea funcției gustative se realizează prin:

– clătirea gurii cu soluția de cercetat, metodă ce exclude stimulii de altă natură (termici, presiune, tact, durere și miros, fumat), asigurând îndepărtarea prealabilă a resturilor alimentare prin clătirea cavității

bucale cu apă distilată la 30°C și respectând o pauză de 40–60 s între aplicările substanței pe limbă, spre a evita adaptarea. Este, de altfel, metoda pe care o folosesc degustătorii profesioniști;

– tamponarea sau pensularea limbii, menținută de examinător cu o compresă de tifon, metodă care respectă, de asemenea, clătirea cavității bucale și pauzele dintre aplicările substanței, pentru a nu permite adaptarea. Se pot, de asemenea, aplica și soluții sub formă de picătură, permițând o perfectă dozare a substanței de cercetat. Soluțiile vor fi termostătate, iar concentrația lor va crește progresiv, utilizând în practică un set de 60 de flacoane prevăzute cu pipete, așezate într-o cutie portabilă. Este cea mai bună determinare a pragului pentru gusturile fundamentale;

– testul gradării stimulului – ca o metodă cantitativă relativ fidelă, care urmărește aprecierea concentrației unei singure picături dintr-o soluție situată pe o scară liniară absolută, de la 0–100, în care 100 reprezintă maximum de intensitate gustativă reclamată de subiect pentru substanța respectivă, înainte de începerea determinării. Răspunsurile se plasează pe curba concentrațiilor și se apreciază dacă sensibilitatea gustativă este păstrată. Neajunsul metodei constă în faptul că suprafața de contact a stimulului gustativ cu mucoasa linguală este prea mică și rezultatele investigării pot fi eronate.

În toate procedeele care urmăresc sensibilitatea gustativă, testarea se realizează simetric, pe ambele părți ale limbii în mod obligatoriu, urmărindu-se diferențele de sensibilitate sau apariția eventualelor confuzii ale gusturilor.

Metodologia explorării gustului prin aplicări de *substanțe solide* sau *gelatinoase* cuprinde un aspect mai complex, urmărindu-se și timpul deolvire în salivă a substanței de examinat. Modul de aplicare este variat:

- pulverizarea substanțelor fin măcinate;
- aplicarea de corpuri poroase îmbibate în soluțiile de cercetat;
- aplicarea cristalelor de sare de bucătărie sau de extract de gențiană, zahăr sau acid tartric;
- gelificarea soluțiilor prin adaos de gelatină 2%. Substanțele gelatinoase sunt utilizate pentru a testa sensibilitatea gustativă palato-faringiană, zonă în care lichidele aderă mai greu.

Utilizarea *substanțelor volatile* permite o mai bună dozare cantitativă a stimulului, dar și o mai corectă localizare a răspunsului.

Explorarea gustului cu *stimuli electrice* prezintă avantajul localizării precise a disfuncției gustative observate, utilizând un stimul la care se poate grada ușor intensitatea și care nu difuzează. În acest sens, electro-gustometria prin curent continuu este deosebit de fidelă și ușor de utilizat. Mecanismul „gustului electric” nu este pe deplin elucidat, dar se încredințează atât electroliza salivei, cât și stimularea directă a stimulilor gustativi. Stimularea elementelor receptoare gustative în această metodă se realizează folosind procedeul bipolar sau unipolar. Electrozii vor fi buni conducători de curent electric, cu suprafață mică și confecționați din material ușor, impolarizabil. Se folosesc pentru explorarea gustului electrozi din Ag sau din Ag–AgCl.

Metoda permite stabilirea excitabilității gustative, determinând reobaza și cronaxia gustativă, latența gustativă, frecvența de contopire a gusturilor. Prin această metodă se determină ușor pragul de stimulare și evoluția adaptării gustative. Pentru explorarea integrității funcționale a nervului facial se utilizează electro-gustometria, procedeu asemănător cu audiometria.

În tulburările genetice, neurologice și endocrinologice, metoda se folosește cu mai mult succes decât cele descrise anterior. Precizia, rapiditatea și comoditatea (nu mai este necesară clătirea cavității bucale după fiecare concentrație) susțin utilizarea explorării sensibilității gustative prin stimuli electrice înaintea celorlalte metode, recomandând-o ca cea mai obiectivă dintre toate celelalte metode de explorare.

Metodele complexe permit, de asemenea, înregistrarea grafică a sensibilității gustative globale cu ajutorul gustometrului automat Bekesy sau individualizarea unei singure papile și aprecierea răspunsului său la un stimul gustativ.

Deși au multă obiectivitate, aceste metode nu s-au răspândit în practica medicală. Pentru investigarea corectă a analizatorului gustativ trebuie ținut seama de simptomatologia acestuia, de cauza genetică sau funcțională situată la nivelul segmentului periferic, de conducere sau al zonei de proiecție corticală, din bolile endocrine și metabolice.

De altfel, în medicina legală și în industria alimentară, analizatorul gustativ este de un real folos pentru decelarea unor substanțe toxice cu gust caracteristic.

19.11. ANALIZATORUL OLFACTIV

Mirosul, ca și gustul, reprezintă un simț chimic ce dă posibilitatea omului și animalelor să-și aleagă hrana și să evite substanțele toxice cu miros specific. Excitarea gustativă va determina indirect excitarea olfactivă și invers, încât cele două simțuri au reale conexiuni funcționale.

Mirosul este simțul cel mai puțin cunoscut, datorită localizării segmentului său receptor în zona superioară a foselor nazale, zonă mai greu de abordat. Este un simț foarte vechi din punct de vedere filogenetic, cu un rol deosebit la animale și mai puțin la om.

19.11.1. PARTICULARITĂȚI STRUCTURALE

Mucoasa olfactivă este localizată în porțiunea superioară a septului nazal, medial pe faldurile cornetului nazal superior și doar pe o mică porțiune a celui mijlociu, acoperind și lama ciuruită a etmoidului, având o suprafață de aproximativ 2,4 cm² pentru fiecare fosă nazală.

În zonele amiotite, mucoasa respiratorie prezintă unele modificări, fiind mai subțire și conținând un epiteliu și un corio mai bogat vascularizate și înervate atât senzitiv, cât și vegetativ.

Epiteliul olfactiv conține celule receptoare, celule de susținere și celule bazale.

Celulele receptoare olfactive (Schultze) se află răspândite printre celulele ciliate de tip respirator, în număr de aproximativ 100 milioane, considerate neuroni bipolari senzitivi derivați din sistemul nervos central.

Celulele bazale vor da naștere în mod continuu primelor două tipuri celulare (receptoare și de susținere), printr-o diferențiere morfologică și funcțională.

Celulele de susținere, cu formă prismatică, prezintă la extremitatea apicală cili. Conțin granulații de caroten sau ester ai vitaminei A, ce au rol deosebit în funcția acestor celule. În afara rolului de susținere, aceste celule au și un rol trofic pentru epitelul olfactiv.

Celulele receptoare olfactive se găsesc răspândite printre cele de susținere. Preluogirea lor dendritică se îndreaptă către suprafața mucoasei nazale, depășind celulele de susținere. Preluogirea dendritică se termină cu o dilatație („buton olfactiv”) ce conține 6-8 granulații, de pe suprafața căreia se exteriorizează mici perisori bogazi în filamente, un fel de microvilozități. Acești cili olfactivi, cu diametrul de 0,3 μm și lungimea de 50-150 μm, vor proemina pe mucoasa olfactivă.

Substanța odorantă din atmosferă intră în contact cu cilul olfactiv prin intermediul mucusului secretat de către glandele Bowman.

Axonii celulelor receptoare suot fibre slab mielinizate, care, după unire, străbat lama ciuruită a etmoidului, realizând nervii olfactivi, ce vor face sinapsă cu celulele mitrale din bulbul olfactiv (al doilea neuron al căii olfactive). Citoplasma celulelor senzoriale olfactive conține un bogat dispozitiv mitocondrial, iar microscopul electronic a pus în evidență suprafețe de contact atât între celulele senzoriale, cât și între acestea și celulele de susținere.

Corionul reprezintă suportul conjunctiv al epitelului. Este format din țesut conjunctiv lax, în care se găsesc frecvente fibre elastice ce realizează o rețea, în ochiurile căreia sunt prezente vase limfatice și fibre nervoase amielinice. Corionul realizează atât fixarea epitelului, cât și vascularizarea adecvată a acestuia, independent de cea a mucoasei respiratorii.

Glandele mucigene Bowman, ce se deschid la suprafața epitelului senzorial vor secreta mucusul ce va influența proprietățile fizice și chimice ale excitantului odorant, probabil prin reacții redox, producând modificările potențialului membranal de repaus al cililor olfactivi, cu apariția potențialului de receptor (fig. 19.43).

Calea de conducere a analizatorului olfactiv este reprezentată de axonii celulelor olfactive (ce constituie primul neuron al căii), grupați în fascicule de 20-30 de fibre, ce vor străbate lama ciuruită a etmoidului și vor forma oervul olfactiv. Aceste fibre fac sinapsă cu dendritele celui de-al doilea neuron, reprezentat de celulele mitrale din bulbul olfactiv, realizând o formă complexă de sinapsă, denumită

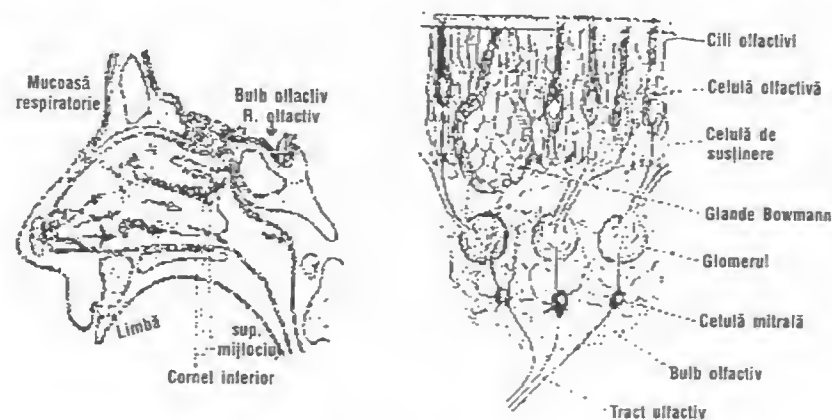


Fig. 19.43. Mucoasa olfactivă – plasare și aspect microscopic.

glomerul olfactiv. Axonii celulelor mitrale vor forma tracturile olfactive, ce se vor îndrepta spre zonele de proiecție corticală.

Proiecția corticală: la extremitatea sa posterioară, tractul olfactiv se bifurcă în două brațele mici (striuri olfactive), care vor avea direcții diferite. Bandalet olfactivă externă se va termina în uncusul hipocampului, iar cea mediană în partea anterioară și inferioară a ciocului corpului calos (septum). Între aceste două arii de proiecție din paleocortex există numeroase relații anatomice și funcționale, care leagă septul de uncusul hipocampic.

Ramul maxilar al trigemenului va conduce și el influxuri olfactive din zona mucoasei respiratorii superioare. În realizarea unei imagini olfactive complexe, pe lângă analizatorul olfactiv participă și cel gustativ, cât și sensibilitatea senzitivă din această regiune.

La om, zona corticală a olfacției prezintă și funcții asociative – psiho-emoționale și comportamentale, dar și funcții viscero-reglatoare.

Căile nervoase ce părăsesc nucleul amigdalien și uncusul hipocampic (cortex – entorinal) joacă un rol deosebit pentru realizarea olfacției. Aceste fibre, după releul în corpii mamilari, realizează atât tractul mamillo-talamic Vic d'Azir, prin intermediul căruia se transmit impulsuri extrapiramidale legate de olfacție, cât și tractul mamillo-tegmentar, prin care se comandă orientarea capului și ochilor spre o sursă olfactivă, cu participarea tracturilor extrapiramidale tecto- și reticulo-spinale. Tot din fasciculul de fibre ce pleacă din fornix se desprind unele de releu, cu nucleul habenular, după care, prin intermediul substanței reticulate, vor pleca impulsuri ce vor comanda reacții vegetative în mușchii interesați în olfacție. Este cazul reacțiilor somatice din adulmecare, ce orientează corpul și, în special, capul spre sursa olfactivă, dar, în același timp, modifică și ritmul respirator. Probabil că și olivă bulbară este interesată în aceste procese, cât și tractul olivo-spinal.

Cu alte cuvinte, tracturile olfactive se vor proiecta în două zone diferite, și anume, în aria olfactivă mediană și în cea laterală (fig. 19.44). Zona olfactivă mediană include formațiuni plasate superior și anterior față de hipotalamus, cum ar fi septum pelucidum, girul subcalos, trigonul olfactiv, cât și porțiunea mediană a substanței perforate anterioare (centrii primari ai olfacției).

Aria olfactivă laterală cuprinde zona prepiriformă, uncusul hipocampic, zona laterală a substanței perforate anterioare și o parte a nucleilor amigdalieni (centrii secundari ai olfacției).

Ariile secundare olfactive vor comanda răspunsul emoțional al olfacției din cursul stărilor de frică, al plăcerii, al acțiunii sexual etc. și vor avea strânse legături funcționale cu cortexul temporal și cel

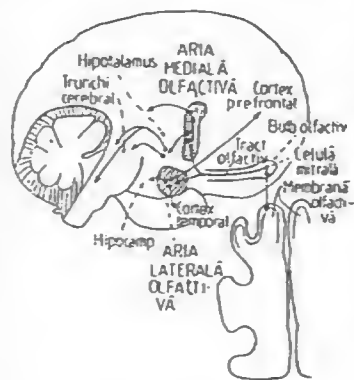


Fig. 19.44. Proiecția corticală a sensibilității olfactive.

sunt volatile și să ajungă în concentrație suficientă la nivelul superior al foselor nazale, cât și solubilă în apă, pentru a se putea dizolva în stratul de mucus ce acoperă zona olfactivă, în vederea excitării cililor celulelor senzoriale de la acest nivel. Deoarece în structura cililor olfactivi cât și a membranei celulelor olfactive se găsesc lipide în cantitate mare, substanțele odorante trebuie să fie și liposolubile, în vederea unui contact mai intim cu receptorul.

Odată cu aerul inspirat, diversele substanțe din mediul înconjurător ajung în zona superioară a foselor nazale, unde, dacă îndeplinesc condițiile de mai sus, vor excita cilii olfactivi și vor da naștere unui potențial de receptor ce se va propaga prin segmentul de conducere sub forma impulsurilor nervoase. Dacă se plasează un electrod de culegere pe suprafața mucoasei olfactive, se înregistrează un potențial bioelectric. Introducerea în cavitatea nazală a unei substanțe odorante negativăază potențialul și-l menține prezent atât timp cât în fosa nazală persistă stimulul olfactiv. Dacă se înregistrează acest potențial, graficul obținut va fi electroolfactograma, care nu este altceva decât însumarea potențialelor de receptor a tuturor celulelor olfactive excitate.

Amplitudinea și frecvența potențialului sumat vor depinde direct proporțional de logaritmul intensității stimulului olfactiv, ceea ce denotă faptul că receptorii olfactivi sunt traducători ai acțiunii stimulului în influx nervos, fenomen întâlnit la toți analizatorii.

19.11.3. SENZAȚIA OLFACTIVĂ

Deși omul este considerat un microsmatic, datorită zonei olfactive și a proiecției corticale restrânse, el este, totuși, capabil să recunoască o gamă largă de mirosuri. Este greu de stabilit și de clasificat substanțele odorante ce realizează senzația primară olfactivă. Înregistrarea potențialelor de acțiune din diverse puncte ale căilor nervoase olfactive a pus în evidență prezența unui număr de șapte clase de substanțe olfactive, care excită separat celulele receptoare olfactive.

Aceste categorii de stimuli olfactivi includ camforul, moscul, mirosul florilor, al eterului, mirosul mentolat înepător și putred. În ultimii ani, cercetările de neurofiziologie arată că există peste 50 de senzații primare olfactive, arătând cât de vast poate fi excitat acest analizator comparativ cu cel gustativ, impresionat doar de patru gusturi fundamentale, sau cu analizatorul optic, sensibil doar la trei culori primare. În funcție de sensibilitatea olfactivă și de antrenament, se pot obține chiar peste 50 de senzații olfactive.

prefrontal. Distrugerea experimentală a acestor arii afectează răspunsul primar olfactiv, cum ar fi lingerea buzelor sau salivarea produsă de mirosul unor alimente, încât această zonă poate fi considerată în realitate adevăratul cortex primar olfactiv.

Zona olfactivă corticală are și rol inhibitor asupra neuronilor mitrali din bulb olfactiv, trimițând spre aceștia impulsuri de comandă inversă. Dacă celulele mitrale au o activitate prea intensă, excitând cortexul olfactiv prin impulsuri prea frecvente, acesta are posibilitatea să limiteze ritmul descărcărilor celulelor mitrale prin circuite de *feed-back* negativ de protecție corticală.

Între centrii primari și secundari ai olfecției, cât și între aceștia din urmă și talamus, hipotalamus și trunchiul cerebral, se realizează numeroase conexiuni funcționale ce participă la formarea arcurilor reflexe legate de miros.

19.11.2. STIMULAREA RECEPTORILOR OLFACTIVI

Pentru ca o substanță să fie considerată stimul olfactiv trebuie să îndeplinească mai multe condiții. În primul rând, să

Formarea senzației olfactive are la bază cele două teorii, chimică și fizică, care încearcă să explice specificitatea de răspuns doar la anumiți stimuli ai celulelor senzoriale olfactive.

Conform teoriei chimice, se admite apariția anumitor reacții chimice între moleculele excitantului olfactiv și elementele de structură ale cililor receptori. Răspunsul tradus în celula receptoare va rezulta din interacțiunea chimică a celor două structuri și va fi specific pentru fiecare stimul olfactiv. Datorită reacțiilor ce au loc între moleculele excitantului și ale receptorului, va apărea modificarea permeabilității membranei cililor olfactivi față de ioni de Na^+ și K^+ , cu apariția potențialului de receptor în celula senzorială olfactivă, ce va crea impuls nervos propagabil prin căile nervoase până la zonele centrale corticale.

Teoria fizică aduce în discuție existența unor locuri pe cilii olfactivi, unde are loc adsorbția substanței olfactive, fenomen ce se produce selectiv pe celulele receptoare. Teoria este susținută și de faptul că multe substanțe care au proprietăți chimice foarte diferite, dar cu configurația moleculară identică, realizează aceeași senzație olfactivă; înseamnă că proprietățile fizice ale stimulului olfactiv au o importanță mai mare decât cele chimice pentru formarea senzației de miros specific.

Din punct de vedere chimic, majoritatea substanțelor odorante fac parte din grupele IV-VII ale tabelului Mendeleev, iar greutatea lor moleculară se plasează între 17 (amoniac) și 300 (terpen).

Substanțele chimice cu greutate moleculară mică excite în special zona trigemenului, producând lăcrimarea, iar cele cu greutate moleculară mare sunt excitante ai mucoasei olfactive. Pe măsura creșterii greutății moleculare, intensitatea mirosului este mai mare, dar numai până la un anumit punct, după care mirosul dispare. Compușii aromatici au un miros mai pronunțat decât cei olfactivi, în funcție de numărul de atomi și ai catenelor laterale, dar tot până la un anumit maximum, după care ou se mai percepe nici un miros.

Pentru proprietățile odorante ale substanțelor interesează solubilitatea în apă și lipide, viteza de difuziune, presiunea vaporilor rezultați din volatilizarea substanței respective. Interesează, de asemenea, calitățile tensioactive și gradul de adsorbție a substanțelor mirositoare pe membrana cililor olfactivi, știind că și vaporizarea va fi stimulată de temperatura crescută, de luminozitate etc.

Pentru obținerea unei senzații olfactive corecte, organul olfecției trebuie îndreptat spre sursa mirositoare, iar stimulul olfactiv trebuie să aibă o anumită concentrație în aerul inspirat. Este vorba și de reflexul de adulmecare, mai bine reprezentat la animale decât la om.

S-a încercat o clasificare a substanțelor odorante după structura lor chimică și după răspunsul olfactiv și s-a observat că sunt substanțe identice chimice care dau senzații olfactive diferite, după cum sunt substanțe cu structură chimică diferită dar care creează aceeași senzație olfactivă sau amestecuri de senzații olfactive.

Pentru explorarea capacității olfactive s-a admis o altă clasificare a substanțelor odorante, și anume:

- substanțe olfactive pure (O), care activează numai receptorii olfactivi;
- substanțe trigeminale pure (T), care activează doar receptorii trigeminali;
- substanțe olfacto-trigeminale (O+T), realizând excitare olfactivă și trigeminală;
- substanțe olfacto-gusto-trigeminale (O+G+T), care excite toate tipurile de receptori din zonă.

Mirosul are și o componentă afectivă, realizând plăcere sau neplăcere. De aceea se consideră că mirosul este mai important decât gustul în alegerea produselor alimentare. Dacă mirosul unui aliment a produs unei persoane o senzație dezagrabilă, la al doilea contact cu același miros vor apărea o totală aversiune, greață sau vomă. Este de amintit și faptul că un anumit miros al femeii atrage masculul, denotând că simțul mirosului are și o deosebită importanță pentru viața sexuală.

Pragul olfactiv se referă la cea mai mică concentrație în aer a unei substanțe odorante, capabilă să realizeze o senzație olfactivă. Ca exemplu poate fi luat metilmercaptanul, ce poate fi sesizat la o concentrație de numai 1/25 000 000 000 mg într-un ml aer. Din acest motiv, metilmercaptanul se amestecă în cantități mici cu gazul natural pentru a fi depistate precoce defecțiunile din instalațiile tehnice ale acestuia. Este destul de dificilă determinarea pragului olfactiv al unei oarecare substanțe și necesită cooperarea perfectă a subiectului.

Valoarea pragului olfactiv depinde de structura chimică a substanței odorante și de sensibilitatea olfactivă a persoanei de examinat.

Lumina amplifică sensibilitatea olfactivă, după cum temperatura crescută o reduce.

Sensibilitatea olfactivă crește progresiv de la vârsta de 5 ani spre 25 de ani, după care se constată o scădere a acesteia. Foamea stimulează olfecția, în timp ce sațietatea o diminuează. Experiența practică a pus,

de asemenea, în evidență o sensibilitate olfactivă mai crescută la femei față de bărbați, în special în perioada ovulației și a gravidității.

Sunt situații în care pot fi sesizate separat sau simultan mirosuri din amestecuri odorante, după cum mirosurile puternice inhibă pe cele slabe.

În cazul afectării segmentului intermediar al analizatorului olfactiv sau a mucoasei nazale, unde este prezent receptorul, se constată reducerea sensibilității olfactive (hiposmie) sau dispariția sa totală (anosmie).

Tumorile de lob temporal sau de uncus hipocampic pot realiza creșterea exagerată a sensibilității olfactive (hiperosmie), până la producerea halucinațiilor olfactive.

19.11.4. ADAPTAREA OLFACTIVĂ

În cazul în care un excitant olfactiv acționează un timp prea îndelungat, sensibilitatea olfactivă se reduce progresiv, până la dispariție. Este fenomenul de adaptare a receptorului față de mirosul respectiv, deși se constată, în același timp, persistența sensibilității pentru alte mirosuri.

După un timp în care excitantul ce a produs adaptarea nu mai acționează asupra receptorului olfactiv, sensibilitatea acestuia revine.

Se descriu o *adaptare heterogenă*, când se pierde sensibilitatea olfactivă pentru amestecuri odorante, și *adaptarea omogenă*, pentru o anumită substanță mirositoare.

Adaptarea olfactivă, ca și cea gustativă, este o formă de apărare a receptorului față de un excitant puternic și persistent, cum este cazul muncitorilor din industria parfumurilor.

19.11.5. EXPLORAREA FUNCȚIEI OLFACTIVE

Olfactometria reprezintă metoda de apreciere a capacității senzoriale a analizatorului olfactiv. Se disting o olfactometrie subiectivă, bazată pe sinceritatea subiectului investigat, și o olfactometrie obiectivă, bazată pe date culese independent de voința subiectului; ambele metode disting o olfactometrie cantitativă (de acuitate olfactivă) și una calitativă.

Olfactometria cantitativă stabilește gradul acuității olfactive pentru diferite mirosuri.

Olfactometria calitativă stabilește pragul și oboseala olfactivă, discriminarea sau finețea rămânând de ordin experimental, nefiind utilizate în clinică.

Pentru ambele metode, în olfactometria subiectivă se cunosc aparate relativ simple: olfactometrul Zwardemaker, olfactometrul Elberg, fiecare prezentând avantaje și dezavantaje.

Olfactometria obiectivă are posibilitatea aprecierii stimulului aplicat indiferent de voința subiectului, un astfel de exemplu îl constituie olfactometrul Castello-Bilotti. De altfel, în același sens poate fi utilizată și olfactometria parenterală, cu investigarea sensibilității afective bazată pe teste de sinceritate.

19.12. FUNCȚIILE MOTORII ALE SISTEMULUI NERVOS

Concepută sub forma unei veritabile scheme cibernetice, întreaga activitate motorie a organismului a ajuns la o înaltă perfecționare pe baza cooperării unui întreg lanț de circuite neuronale aferente și eferente, interconectate labil în cele mai diverse moduri.

O astfel de schemă stă de altfel la baza evoluției comportamentului motor uman, asigurând dezvoltarea unui complex de deprinderi motrice cu largi implicații funcționale.

În acest ansamblu, un rol crucial îi revine axului cerebro-spinal, cu sistemul său de conducere periferică senzitiv-motorie, atașat structurilor receptoare (kinestezice), pe de o parte, și efectoare (musculare), pe de altă parte. Perfecționarea funcțiilor motorii ale SNC apare, deci, ca o formă superioară a adaptabilității organismului la mediul înconjurător, strâns condiționată de dezvoltarea din ce în ce mai complexă pe scara

filogenetică a etajului său superior, scoarța cerebrală, în expresia cea mai evoluată cunoscută sub numele de „neocortex”.

Informațiile privind necesitatea și desfășurarea diverselor activități motorii adaptate circumstanțelor de viață ale organismului sunt conduse pe căile sensibilității generale și integrate la diverse etaje ale axului cerebro-spinal, deciziile motorii aparținând unuia sau mai multor centri motori, cu origine medulară, bulbară sau protuberanțială, în strânsă dependență cu cei de la nivelul nucleilor cenușii bazali, cerebelului și cortexului cerebral.

În acest cadru, centrii motori medulari și ai trunchiului cerebral sunt implicați în acțiuni reflexe, stereotipe, semiautomate sau automate, unice sau ritmice, necesare pentru realizarea anumitor mișcări, în timp ce cortexul cerebral, nucleii cenușii centrali, alături de cerebel dirijează motilitatea în ansamblu, declanșând, oprind sau modulând mișcările îndreptate spre un anumit scop.

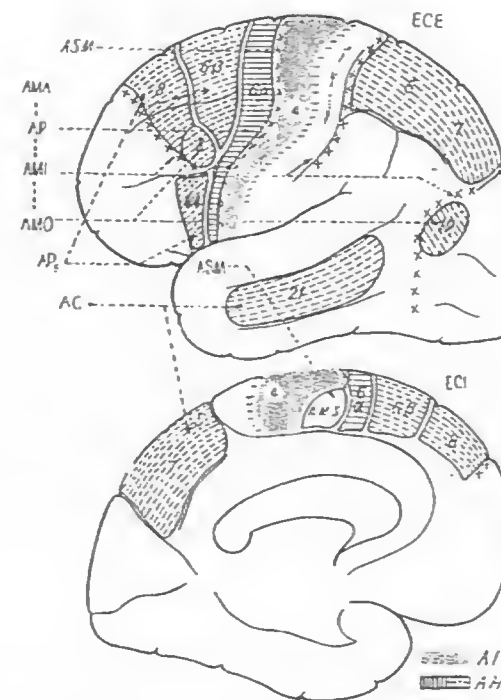


Fig. 19.45. Arii corticale motorii. ASM, aria somato-motorie (4). AMA, aria motricității automate. AP, aria parapiamidală (6). AMI, aria motorie inhibitoare (2S, 4S, 8S, 9S). AMO, aria motricității oculare (8, 19). AC, aria de coordonare cortico-cerebeloasă (5, 7, 8, 21). APs, aria psiho-motoare (6, 8, 44). AMS, aria motricității suplimentare. ECE-ECI, fețele externă și internă ale emisferelor cerebrale. AI, aria motricității ideocinetice.

AH, aria motricității holocinetice.

Declanșarea unor asemenea activități motorii complexe este realizată deopotrivă prin acțiune reflexe (inconștiente) și voliționale (conștiente), care au ca suport anatomic binecunoscutele arcuri reflexe și, respectiv, diverși centri motori de comandă voluntară conectați la căile de conducere ale mesajului efortor.

Câteva date anatomo-fiziologice privind topografia și implicațiile unor astfel de structuri dispuse de-a lungul axului cerebro-spinal permit o privire analitică și sintetică asupra funcțiilor motorii ale sistemului nervos central.

19.12.1. ZONE SI CENTRI MOTORI

19.12.1.1. Cortexul motor

Implicat atât în elaborarea și controlul mișcărilor voluntare precise și fine (motricitatea ideocinetică - telecinezie), cât și a celor semivoluntare sau automate reflexe și posturale (motricitatea holocinetică), cortexul motor și-a extins teritoriul său de acțiune în procesul de perfecționare a unor variate deprinderi motorii prin intermediul a patru tipuri de arii, și anume: aria motricității voluntare, ariile motricității semivoluntare sau automate, ariile de coordonare cortico-cerebeloasă și ariile psiho-motorii (fig. 19.45).

Aria motricității subnare. Situată la nivelul frontalei ascendente, corespunzător ariei 4 Brodman, aceasta este cunoscută sub numele de cortex motor primar, aria somato-motorie, aria electromotorie, aria precentrală sau rolândică, fiind punctul de plecare al căilor piramidale cortico-nucleare și cortico-medulare.

Stimulările suprafeței sale și studiul potențialelor evocate în paralel cu observațiile diverselor acte motorii corespunzătoare acestora au permis să se localizeze cu precizie diverși centri motori ai unor grupe musculare implicate în anumite funcții motorii. Importanța teritoriului rezervat unei anumite funcții motrice este proporțională nu atât cu mărimea grupelor musculare care participă la realizarea ei, ci mai cu seamă cu caracterul precis și nuanțat al unei astfel de funcții.



Fig. 19.46. Homunculus cortical: proiecția corticală somato-motorie și senzitivă (Penfield și Rasmussen, 1950).

Astfel, la maimuța păianjen, aria corticală care comandă mișcarea cozii este în particular foarte dezvoltată, în timp ce, la porc și mistreț, o reprezentare importantă este atașată regiunilor botului, iar la iepuri și rozătoare aria masticatoare are o întindere excepțională.

În acest sens, este justificată la om proiectarea mâinii aproape pe o treime din întreaga zonă senzitiv-motorie a scoarței cerebrale. Astfel încât, aspectul clasic de „homunculus” al reprezentării motricității conștiente apare sub o formă asimetrică, cu mâna și capul de proporții exagerate așezate în jos, la nivelul ariei 4 (fig.19.46).

Teritoriul inferior, corespunzător de jos în sus mușchilor laringelui, limbii și gâtului, cât și cei ai feței se proiectează în fasciculul cortico-nuclear sau geniculat, iar restul – în cel cortico-medular al sistemului piramidal.

De altfel, în majoritatea cazurilor, ariile de proiecție a unor segmente ale corpului se intrică cu ariile de proiecție a segmentelor învecinate, la nivelul fiecărei emisfere existând o predominanță a părții controlaterale a corpului și membrilor, cu excepția zonei cefalice, la care proiecția homolaterală este apreciabil de extinsă.

Un om privat de circumvoluțiunile frontale ascendente este definitiv și total paralizat, excluzând păstrarea unor acte motori reflexe spinale în forma lor cea mai simplistă.

Ariile motricității semivoluntare sau automate. Cunoscută și sub denumirea de motricitate „holocinetică”, în realizarea actelor motorii automate iau parte aria parapiramidălă, aria motorie suplimentară, aria motorie inhibitoare sau supresoare, alături de ariile oculomotorii frontale și occipitale.

Aria parapiplanară. Este situată anterior ariei 4, ocupând 1/3 din restul frontalei ascendente și partea posterioară a zonelor F₁, F₂ și F₃ din aria 6-a Brodman. Denumită și aria motorie secundară, aceasta este în conexiune cu nucleii bazali și formațiunea reticulată mezencefalică, asigurând armonizarea gestului voluntar precis în coordonarea și mișcările de însoțire ataseate așa-zisei „motricități holoconetice”

Aria motorie suplimentară. Pusă în evidență de Penfield și Wooley în zona anterioară a lobului paracentral al frontalei ascendente, ea ar interveni fără îndoială în motricitatea holocinetică legată de mișcările asociate ale mușchilor trunchiului, ai centurii și rădăcinilor membrelor, prin intermediul ariei motorii primare. În același timp, aria suplimentară ar acționa în măsură egală prin mecanisme independente de cortexul motor primar, contribuind în special la activitatea motorie contralaterală.

Aria motorie inhibitoare. Denumită și aria supresoare, sau aria 4S, cu sediul înaintea ariei 4, ea este antrenată în conexiune cu nucleele bazale și, în special, cu formațiunea reticulată talamică în întreținerea unei inhibiții motorii, care moderează mișcările. Astfel de zone ar mai fi semnalate și la nivelul arilor oculomotorii frontale (5S) și occipitale (19S), cât și al celor extrapiramidale parietale (2S).

Excluderea acestei arii determină o puternică hipertonie și o redoare a mișcărilor, ceea ce explică spasticitatea întâlnită în hemiplegia de tip central.

Ariile oculomotorii. Responsabile de mișcările conjugate ale capului și ochilor, acestea cuprind doi centri: *centrul oculomotor frontal*, localizat în aria 8 Brodman la piciorul lui F_2 care, prin acțiunea sa încrucișată, îndreaptă privirea și rotește capul la stânga sau dreapta; *centrul oculomotor occipital*, localizat în aria 19, cu rol *esențial reflex*.

Arii de coordonare cortico-cerebeloase. Sunt răspândite practic în majoritatea cortexului conținător al celulelor piramidale, reprezentând originea fasciculelor fronto-parieto-occipito-temporo-ponto-cerebeloase, din care cei mai importanți sunt fasciculul frontal și cel temporo-pontic. Implicate în coordonarea dinamică a activității motorii, acestea fac conexiuni cu neocerebelul și, printr-un circuit dento-rubro-talamic, închid bucla cu cortexul motor.

Ariile psiho-motorii. Situate în regiunea prefrontală, ele ocupă aria 6 (sectorul 6B) și aria 8, intercalându-se cu zonele activității motorii automate.

Incluzând principalii centri ai elaborării mișcării, aceste arii sunt în același timp mediul fenomenelor de „praxie”, legate de elaborarea unor anumite activități motorii, cum ar fi: „vorbirea”, cu centrul motor localizat la piciorul frontalei ascendente și F_1 (a cărei paralizie determină „anartria”), sau „scrierea”, cu centrul situat la piciorul lui F , în aria 6 (a cărei afectare poate duce la „agrafie”).

În accepțiunea clasică, neuronii ariilor psiho-motorii 6 și 8 sunt considerați ca fiind la originea circuitelor plurineuronale, așa-zisele „extrapiramidale”, cu proiecție subcorticală, având, în același timp, numeroase conexiuni corticale cu aria 4 somato-motorie.

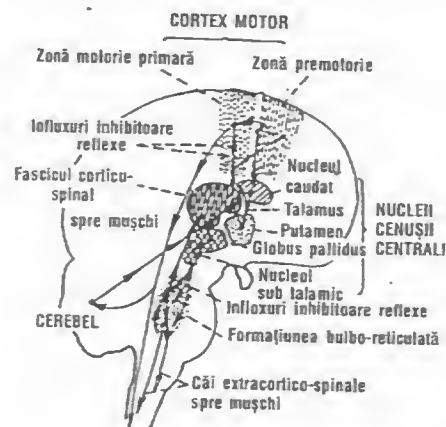


Fig. 19.47. Formațiuni motorii subcorticale (Guyton, 1974).

19.12.1.2. Formațiuni motorii subcorticale

Dacă ariile motorii ale cortexului sunt implicate în declanșarea diverselor acte motorii, asigurând, în același timp, elaborarea, memorizarea și controlul înlănțuirii lor, menținerea, ajustarea, precizia, durata și amplitudinea acestora sunt sub controlul a numeroase structuri subcorticale, începând de la nucleii cenușii centrali, trunchi cerebral, măduvă, și terminând cu cerebelul, ca formațiune bine distinctă în derivație la axul cerebro-spinal (fig. 19.47).

Unele date suplimentare privind interacțiunea unor astfel de formațiuni în activitatea motorie integrativă a SNC sunt consemnate în cadrul prezentării separate a acestora la capitolele respective, expunerea de față rezumându-se doar la unele aspecte sintetice.

Nucleii cenușii centrali (nucleii bazali). Situați în profunzimea emisferelor cerebrale, aceștia sunt implicați în controlul majorității mișcărilor corporale inconștiente, stereotipice și al celor complexe semivoluntare, ca mersul, cursa, schimbarea direcției etc., alături de cele care asigură dezvoltarea posturilor corporale necesare îndeplinirii unor funcții specifice. Se pare că nucleii cenușii centrali ar juca, de asemenea, un rol important în programarea și elaborarea unei întregi game de activități motorii din cele mai diverse, astfel:

- **nucleul caudat** controlează mișcările de ansamblu ale corpului, care acompaniază mișcările voluntare;

- **putamenul** intervine în asociere cu nucleul caudat pentru controlul mișcărilor de ansamblu care întovărășesc mișcările voluntare. Acești doi nucleii funcționează în cooperare cu cortexul motor pentru controlul unor variate tipuri de mișcări;

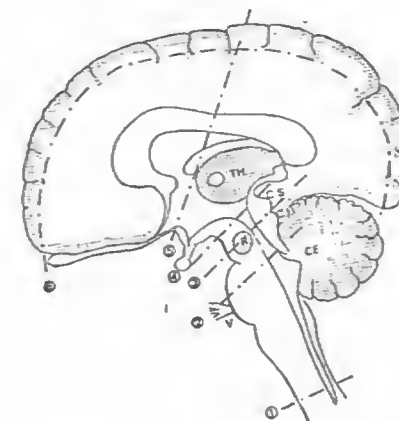
- **globus pallidus** ar controla plasarea diverselor părți ale corpului atunci când un subiect întreprinde o mișcare complexă;

- **nucleul subtalamic** și zonele vecine ar controla mișcarea de marș și chiar unele mișcări corporale ritmice de ansamblu.

Tulburările motricității întâlnite în afecțiunile nucleilor cenușii centrali la om sunt de tip hiper- sau hipokinetic. Bolile hiperkinetice în care există mișcări excesive și anormale sunt: coreea, atetoză și balismul. În boala Parkinson întâlnim deopotrivă atât simptome hiper-, cât și hipokinetic.

Trunchiul cerebral. Prin structurile sale bulbare, pontine și mezencefalice (tuberculi cvadrigemeni, pedunculi cerebrali), trunchiul cerebral reprezintă o importantă stație cu rol motor atât prin prezența nucleilor nervilor cranieni, a unor formațiuni extrapiramidale sau a unor centri reflexi, cât și prin trecerea

Fig. 19.48. Reprezentarea schematică a diverselor secțiuni ale nevraxului. CE, cerebel. CI, colicul inferior. CS, colicul superior. R, nucleul roșu. TH, talamus. V, rădăcina trigemenului. 1, animal spinal. 2, animal medio-pontic pretrigeminal. 3, animal decerebrat transrubric (Sherrington). 4, animal mezencefalic. 5, animal talamic. 6, animal decortecat (Morris, 1971).



unor importante căi motorii sau conectarea la acestea, alături de rețeaua polineuronă a formațiunii reticulare, astfel:

- implicat în activitatea motorie reflexă, trunchiul cerebral este sediul unor importante reflexe la nivel bulbar (deglutiție), protuberanțial (cornean și auditiv de clipire, auditiv-oculogir, masticator de sugere) și mezencefalic (oculo-cefalogir, pupilare, posturale de redresare și statokinetic);

- prin centri tectali, trunchiul cerebral constituie un important sediu de integrare neuro-motorie, în strânsă legătură cu căile reflexe vizuale, prin tuberculi cvadrigemeni anteriori, și cele auditive, prin tuberculi cvadrigemeni posteriori;

- ca origine a căilor descendente vestibulare și reticulare, acesta intervine în reglarea reflexă posturală, facilitând reflexele medulare miotatice. Rolul lor în activitatea tonică posturală este evidențiat de secțiunile trunchiului cerebral efectuate experimental la diverse niveluri, cu obținerea unei așa-zise „rigidități” de decerebrare, care reprezintă o stare de hiperactivitate a reflexelor miotatice (fig. 19.48);

- prin intermediul rețelei polineuronale a formațiunii reticulare, de-a lungul teritoriului bulbo-mezencefalic, trunchiul cerebral intervine în reactivitatea tonică posturală prin componentele sale activatoare și inhibitoare legate, în același timp, de binecunoscuta stare de „veghe sau somn”.

Considerată ca un veritabil nod al sistemelor encefalice de reglare tonică, formațiunea reticulată își exercită efectele prin intermediul motoneuronilor alfa și gamma, cuplați funcțional în cadrul unui sistem de retrocontrol. În acest sistem, se pare că majoritatea conexiunilor se stabilesc în principal cu motoneuronii gamma-statici, intricati în controlul activității posturale (fig. 19.49).

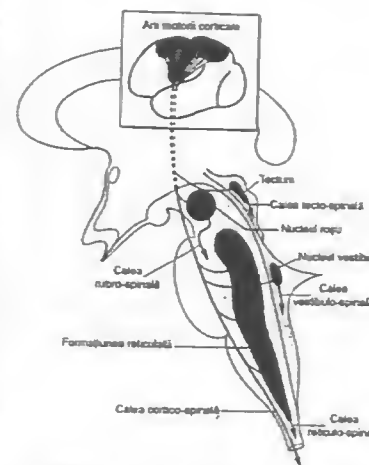


Fig. 19.49. Formațiunile și căile cortico-subcorticale implicate în activitatea tonică posturală.

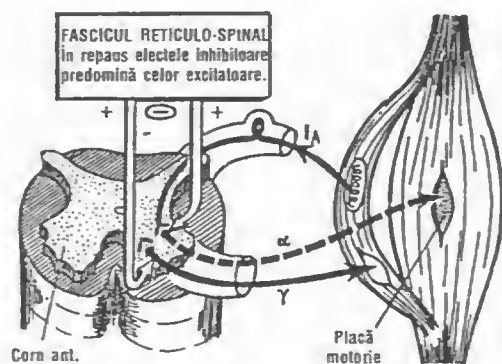


Fig. 19.50. Controlul reticular al reflectivității tonice medulare prin motoneuronii cuplului alfa-gamma.

19.12.1.3. Măduva spinării

Prin formațiunile sale de conducere și activitate reflexă, măduva ocupă un loc aparte în cadrul activității motorii voluntare și reflexe, fiind sediul căii finale a sistemelor piramidale și extrapiramidale conectate la rețeaua motorie periferică a neuronilor alfa și gamma (fig. 19.50).

Modularea reflectivității tonice prin intermediul acestui cuplu alfa-gamma asigură o adaptare continuă a tonusului bazal, postural și de expresie, permițând declanșarea, menținerea și finalizarea diverselor acte motorii reflexe, cu punct de plecare medular sau supramedular, alături de cele voluntare, cu punct de plecare cortical.

În acest sens, acțiunile medulare experimentale (animal spinal) sau accidentale (fractură de coloană) sunt însoțite de pierderea definitivă a motricității voluntare, alături de o areflexie temporară, cunoscută sub numele de „șoc spinal”; ulterior are loc o trecere printr-o hiperexcitabilitate pe flexori, apoi pe extensori, cu predominanța unei spasticități și hiperreflectivități medulare.

Astfel, paralizii postsecționale medulare, cel puțin în parte, poate fi interpretată prin pierderea motricității gamma private de influențele facilitatoare supraspinale. Din contră, „rigiditatea” de decerebrare ar fi rezultatul unei „crampe fusale”, datorită stimulării excesive cu punct de plecare supraspinal a motoneuronilor gamma prin neuronii trunchiului cerebral situați sub secțiune.

Existența motoneuronilor alfa tonici și fazici, atașați fibrelor musculare extrafusale, cât și a celor gamma statici și dinamici, atașați fibrelor intrafusale, prin influențele periferice medulare și supramedulare, atrag atenția asupra modului și a locului pe care îl ocupă etajul medular în activitatea motorie, de la simple acte reflexe sau semiantomate, până la câștigarea unor complicate deprinderi motrice, fie ele stereotipe, automate, fie ele conștiente, voluntare.

19.12.1.4. Cerebelul

Plasat în derivație cu axul cerebro-spinal, această formațiune participă la diverse activități motorii (de postură și echilibru, activitate tonică și de coordonare a mișcărilor), prin cele trei sisteme diferențiate filogenetic și anatomo-fiziologic: arhicerebelul, paleocerebelul și neocerebelul.

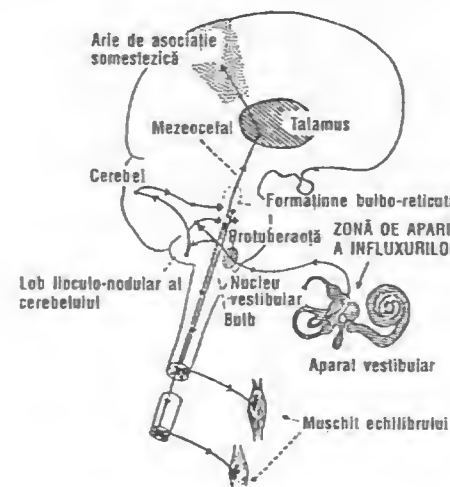


Fig. 19.51. Cerebelul și funcția motrică: controlul reflectivității labirintice și statokinetică de echilibrare.

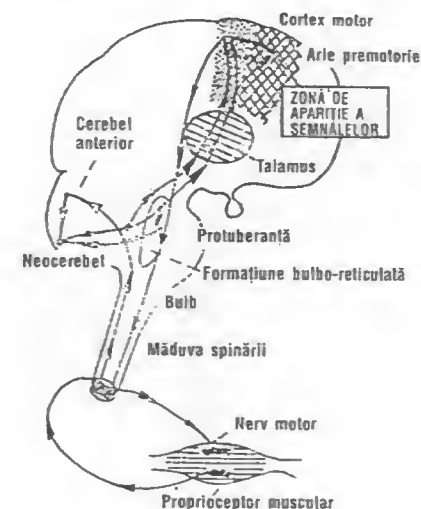


Fig. 19.52. Controlul posturii și al mișcărilor voluntare.

Arhicerebelul. Constituie creierul vestibular, fiind considerat ca centru al echilibrului gravitațional prin participarea sa la coordonarea reflexelor de redresare labirintice și statokinetică. Astfel de implicații funcționale explică tulburările de statică și mersul ebrios în cazul unor leziuni cerebeloase (fig. 19.51).

Paleocerebelul. Este considerat un veritabil creier proprioceptiv, prin implicația sa în reglarea tonusului muscular, a contracției musculare de echilibru și de compensare oportună a stăruirii bipede sau a altor atitudini posturale.

Astfel de funcții motorii justifică convergența la nivelul său a căilor sensibilității proprioceptive inconștiente și a celor conștiente legate de os, articulații, tendoane și mușchi, alături de cele ale unui contingent din sensibilitatea superficială implicate în recunoașterea diverselor „poziții” și „posturi” (fig. 19.52).

Rolurile motorii ale paleocerebelului explică, astfel, cortegiul tulburărilor de tonus muscular, cu hipertonie, dispariția reflexelor de susținere și redresare, observate în leziunile cerebeloase și cunoscute sub numele de „ataxie cerebeloasă”.

Neocerebelul. Considerat ca elementul cel mai evoluat în ierarhia cerebeloasă, neocerebelul constituie dispozitivul reglator și coordonator al mișcărilor, în general, și al celor de la nivelul extremităților, în particular, fiind responsabil de perfectă armonie a gesturilor și, indirect, a motricității voluntare. Astfel de implicații explică simptomatologia particulară a ataxiei cerebeloase, cu hipermetrie, tremurătură intențională, opusă celei din parkinsonism, care este atenuată prin mișcare.

Prin cele trei formațiuni amintite, cerebelul cooperează la realizarea unei activități motorii, și anume:

– funcția de „amortizare” a cerebelului: în vederea executării unei mișcări pentru atingerea unui anumit scop, cerebelul trimite semnale în *feed-back* cortexului motor și nucleilor cenușii centrali, pentru declanșarea frânei (amortizării) mișcării prin mușchii antagoniști. El poate, în acest caz, excita sau deprima activitatea motorie a cortexului și, astfel, poate adapta puterea, durata și amplitudinea mișcărilor musculare în funcție de actul care urmează să fie realizat.

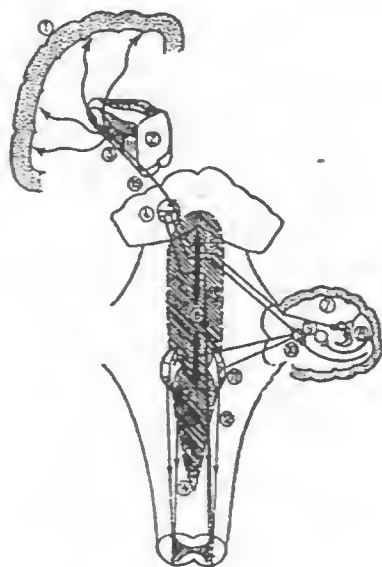


Fig. 19.53. Conectarea în derivație a cerebelului la axul cerebro-spinal. Circuitul cerebello-cortical: n. dințat (8); n. roșu parvocelular (4); n. ventrolateral talamic (2); cortexul senzitivo-motor (1). Circuitul cerebello-spinal: n. fastigial (9); n. roșu magnocelular (4); calea rubro-spinală (13); n. vestibular (11); calea vestibulo-spinală (12); formațiunea reticulată (6) (Lhermitte, 1973).

Dispariția funcțiilor de amortizare a cerebelului determină apariția stării patologice de ataxie. Aceasta se definește ca o necoordonare a contracției diferiților mușchi. Ataxia poate apărea atât la picioare, perturbând poziția de stațiune verticală, cât și la mâini, afectând profund activitățile acestora (incapacitatea de a scrie, de a tăia unghiile, de a executa o mișcare precisă fără eroare etc.). Astfel de implicații explică de ce distrugerea cerebelului nu împiedică atât mișcarea, cât desfășurarea ei;

- funcția de previziune a cerebelului, tradusă prin facultatea acestuia de a prevedea poziția diferitelor părți ale corpului în fiecare moment al mișcării;

- funcția de echilibrare a cerebelului se asigură prin lobul floculo-nodular, care intervine în menținerea poziției verticale a corpului împotriva atracției gravitaționale, prin semnale primite de la aparatul vestibular, nucleii vestibulari și zona bulbo-reticulată a trunchiului cerebral. În același timp, aceste informații sunt corelate permanent cu cele ale sensibilității proprioceptive inconștiente și conștiente, cât și cu cele ale sensibilității superficiale și vizuale.

În realizarea acestor funcții, cerebelul se comportă ca un mecanism de *feed-back* compensator pentru controlul activității motrice a cortexului și a nucleilor cenușii centrali. Actualmente, este admis că cerebelul ar juca un rol în provocarea mișcărilor rapide și balistice (mișcări sacadate) și că acestea, în opoziție cu mișcările lente de târâre, nu relevă un retrocontrol.

Cât privește mecanismul de retrocontrol, cerebelul primește informații ale cortexului asupra mișcărilor musculare ce sunt prevăzute pentru executare și, în același timp, informații proprioceptive directe ale corpului asupra mișcărilor deja îndeplinite. După compararea actelor prevăzute și a celor îndeplinite, cerebelul intervine prin semnale colectoare pentru „alinarea” acțiunii executate la actul prevăzut sau dorit.

Intervenția cerebelului în activitatea motrică, prin modalitățile semnalate, are la bază faptul dispunerii sale în derivație cu axul cerebro-spinal, astfel încât descărcările cerebeloase nu ajung la nivelul căii finale motricii medulare decât prin structuri intermediare pe care le modulează (formațiunea reticulată, cortexul cerebral etc.), spre deosebire de cortexul motor, în special cel primar, care trimite mesajele sale motorii direct la măduvă prin căi specializate ale sistemelor piramidal și extrapiramidal (fig. 19.53).

19.12.2. CĂILE MOTORII DE CONDUCERE

Considerațiile prezentate privind existența unui câmp întins de zone corticale implicate în elaborarea și desfășurarea diverselor tipuri de activitate motrică, în afara cortexului motor primar unanim acceptat, nu mai permit o suprapunere a fasciculelor anatomice și a funcțiilor motorii după schema clasică simplificată a celor două căi: piramidală (cu doi neuroni pentru motricitate voluntară) și extrapiramidală (multineuronala atașată motricității semivoluntare automate).

Actualmente sunt acceptate două clasificări, una pe bază neurofiziologică, privind conducerea motricității ideocinetice, holocinetice, semivoluntare și automate, ale căror mesaje sunt dirijate prin fascicule diferite, și alta, anatomică, clasică, ținând cont de cele două căi și tipurile de fibre care le conțin, urmată și în tratarea de față.

Calea piramidală. Ca asamblare bineuronală (corticală și medulară), formând un veritabil sistem de conducere rapidă, această cale ia naștere în ariile cortexului motor descrise deja (aria 4, aria suplimentară, aria parapiramidală), precum și în celulele piramidale răspândite în cea mai mare parte a cortexului și, în particular, în cel al regiunilor frontale (aria premotorie) și parietale (aria motrică postcentrală).

Cele două fascicule constitutive (cortico-nuclear și cortico-medular) urmează un traiect cu particularități topografice binecunoscute din anatomie, încât, în final, cvasitotalitatea căii cortico-spinale, ca și cea nucleară fac sinapsă cu motoneuronii controlaterali originii sale corticale (fig. 19.54).

În ultimul timp, se precizează că majoritatea fibrelor piramidale sunt conectate la motoneuronii medulari (alfa și gamma) prin intermediul unor neuroni intercalari, influențând mai mult musculatura flexoare proximală a membrilor, în timp ce contingentul terminat direct ar fi implicat în mișcările fine și precise ale degetelor și ale celor executate prin intermediul nervilor cranieni (fig. 19.55).

Astfel constituită, calea piramidală conduce deopotrivă mesajele motricității ideocinetice (voluntare) și holocinetice (automate), a căror asociere este indispensabilă pentru elaborarea și executarea oricărui gest sau act motor volitiv.

În acest sens, apar unele diferențe fundamentale între semnele de deficit neurologic observate în cazul afectării diverselor niveluri ale acestor căi.

- În cazul atingerii unor zone de la nivelul emisferelor cerebrale, paralizii motorie va rămâne în întregime controlaterală, atât pentru fasciculul cortico-nuclear, cât și pentru cel medular.

- Dacă, din contră, atingerea va fi la nivelul trunchiului cerebral, prin cauze predominant vasculare și unilaterale, interceptarea motrică va interesa totalitatea căii piramidale dedesubtul leziunii, fiind în același timp controlaterală.

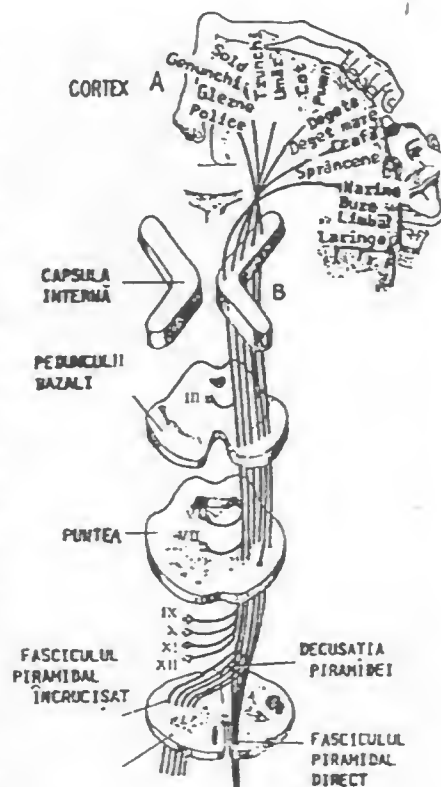


Fig. 19.54. Căi motorii centrale: fasciculul piramidal cortico-nuclear (III, VII, IX, X, XI, XII); fasciculul cortico-spinal. Proiecția corticală (A), traiect (B).

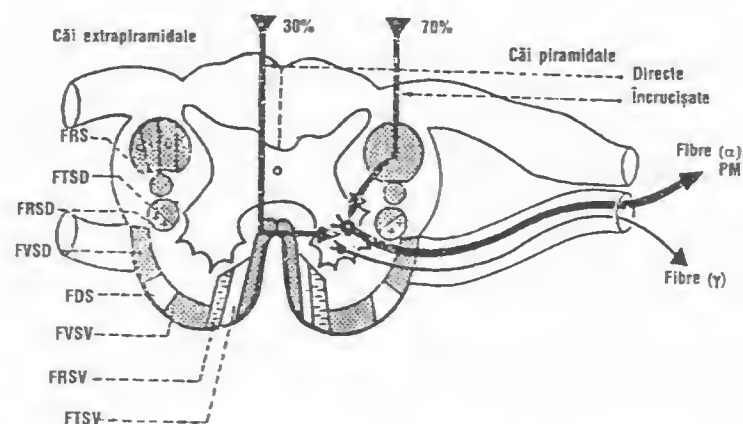


Fig. 19.55. Răce medulare ale căilor motorii centrale. FRS, fasciculul reticulo-spinal. FTSD, FTSV, fasciculele tecto-spinale dorsal și ventral. FRSD, FRSV, fasciculele reticulo-spinale dorsal și ventral. FVSD, FVSV, fasciculele vestibulo-spinale dorsal și ventral. FOS, fasciculul olivo-spinal. PM, calea motorie periferică.

– Distrugerea piramidei bulbare produce o paralizie a musculaturii inervate de motoneuronii mielo-merelor situate dedesubtul leziunii. Paraliza în acest caz este totală în ce privește comanda mișcărilor spontane și voluntare, cu conservarea reflectivității medulare.

– Sub piramide, leziunile motorii determină deficite homolaterale datorită predominanței fasciculului piramidal încrucișat. Investigațiile electro-fiziologice, corelate cu observațiile clinice și cele de explorare funcțională neuro-motorie au confirmat din ce în ce mai mult complexitatea interacțiunilor multineuronale care intervin în conducerea și modularea mesajelor neuro-efectoare, cu existența a multiple colaterale emise de-a lungul traiectului prin măduvă a căii piramidale. Aceasta ar explica multitudinea posibilităților de modulare a mesajului motor cortical atât pe traiectul neuronului central cortical, cât și al celui medular periferic, cu deosebit răsunet în desfășurarea celor mai variate funcții motorii (reglarea tonusului muscular, menținerea echilibrului, asigurarea diverselor praxii etc.).

Calea extrapiramidală. Considerate ca o derivație de conducere secundară a mesajelor tonice posturale, a mișcărilor automate și asociate, alături de cele coordonatoare ale mișcărilor semivoluntare sau voluntare, căile extrapiramidale formează un ansamblu de circuite extrapiramidale (fig. 19.56).

Centrii motori extrapiramidali. Centrii corticale ocupă un vast teritoriu de origine al celulelor piramidale, fiind situate în special în cortexul prefrontal (ariile 6 și 8), la nivelul frontalei (aria supresoare 4S), în cortexul parietal (ariile 1, 2, 3 și 5), în cortexul temporal (aria 21), cât și în cortexul occipital (aria 19).

Centrii tectali sunt situați la nivelul tuberculelor cvadrigemeni care, în conexiune cu corpii geniculați, reprezintă originea arcurilor reflexe vizuale și auditive implicate, după cum se știe, în diverse acte motorii prin căile tecto-spinale.

Centrii optostriari sunt situați la nivelul corpiilor striati, exercitând prin intermediul neostriatului (nucleul caudal și putamen) o acțiune în special inhibitoare, în timp ce paleostriatul (globus pallidus), ca

nucleu efortor, trimite proiecții în special spre cortexul frontal, talamus și nucleii suboptio-striari.

Nucleii suboptio-striari sunt reprezentați prin diverse structuri subcorticale (zona incertă, corpul Luis, locus niger, nucleii rafeului), fiind implicați în elaborarea mișcărilor de însoțire auxiliare, cum ar fi: balansarea brațelor în timpul mersului etc.

Nucleii trunchiului cerebral (nucleul roșu, oliva, complexul vestibular și substanța reticulată) joacă un rol deosebit de important în reglarea tonusului muscular, în special prin structurile paleo-rubrice, vestibulare și reticulate, prin intermediul fasciculelor rubro-spinal, vestibulo-spinal și reticulo-spinal.

Cerebelul. Atașarea sa la sistemul extrapiramidal îl face ca un veritabil dispozitiv de coordonare statică și dinamică a activității motorii, prin colaborarea sa cu structurile motorii corticale și cu nucleii cenușii centrali, asigurând execuția armonioasă și continuă a diverselor mișcări voluntare sau automate.

Circuite extrapiramidale. Complexitatea conexiunilor și centrilor care iau parte la realizarea lor nu permite o tratare exhaustivă, dar dintre acestea pot fi reținute doar unele, în forma unor circuite organizate sau căi ale motricității automate.

– Ca **circuite organizate**, pot fi reținute: bucla „cortex-nuclei bazali-cortex”, care, prin intermediul ariilor supresoare corticale (4S), moderează tonusul și intensitatea mișcării, cât și bucla „cortex-cerebel-cortex”, plasată în derivație pe marile căi motorii corticale și care deține locul unui sistem de coordonare dinamică atât a mișcărilor voluntare corticale, cât și a diverselor acte motorii subcorticale. Alături de acestea, un rol important îl deține bucla „cortex-formațiune reticulată-cortex”, care, prin intermediul cortexului parpiramidal, intervine fie în sens inhibitor, fie activator pentru elaborarea diverselor acte motorii, bucla „nucleii trunchiului cerebral-cerebel-nucleii trunchiului cerebral”, care, prin intermediul olivei și nucleilor vestibulari, reglează coordonarea statică și în particular stațiunea bipedă, în strânsă concordanță cu cea a tonusului muscular. În acest sens, circuitul este în strânsă relație cu aferențele optice și cele ale sensibilității profunde inconștiente (fig. 19.57).

– **Căile motricității automate:** alături de buclele de control și de coordonare amintite, căile motorii extrapiramidale, cu origine în ariile prefrontale 6 și 8, aria temporală 21 și nucleii bazali, conduc mesajele motricității automate atât moștenite (mers, masticție), cât și dobândite (scris, băut la mașină, cântat la pian etc.).

În ultimă instanță, astfel de circuite neuroconectoare intervin asupra celor doi neuroni piramidali (central și periferic) intensificând sau moderându-le activitatea proprie, în sensul unei adaptări continue la nevoile motrice de circumstanță.

Căile oculomotorii. Între diversele circuite motorii piramidale și extrapiramidale, căile oculomotorii prezintă o deosebită importanță atât prin autonomia lor funcțională, cât și prin originea lor dublă, somatică și vegetativă, strâns legată de motricitatea voluntară sau reflexă. O astfel de autonomie în ansamblul complex al funcțiilor motorii cerebrale devine necesară prin imperativele de coordonare și, mai cu seamă,

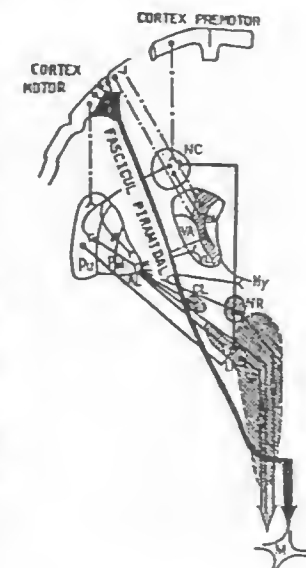


Fig. 19.56. Schema sistemului extrapiramidal. ---, circuitul cortico-strio-pallido-talamo-cortical. - - -, circuitul pallido-subolivo-talamo-reticulat. Pu, putamen. Pal, pallidum. NC, nucleul caudat. VA, VL, nucleii ventrali anterior și lateral ai talamusului. CL, corpul Luis. NR, nucleul roșu. LN, locus niger. SR, substanța reticulată. Hy, hipotalamus. DM, nucleul dorso-median. M, motoneuron. AL, ansa lenticulară.

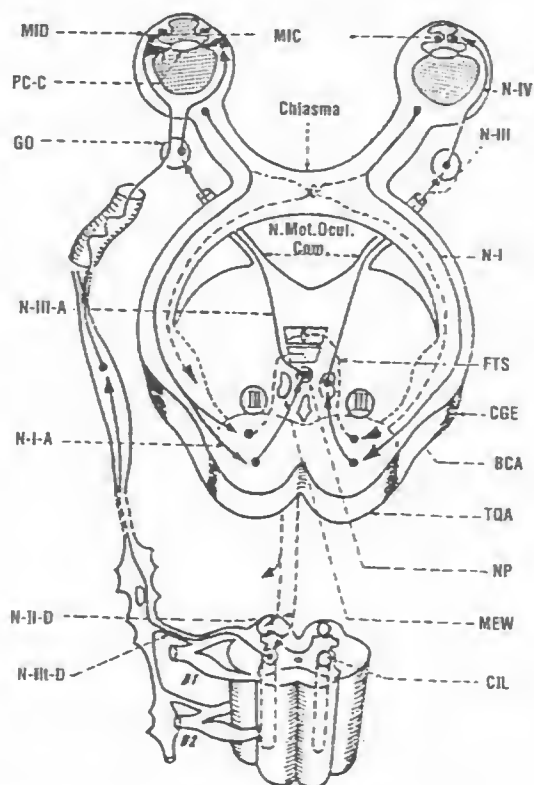


Fig. 19.58. Căile motricității oculare intrinseci. MID, mușchii iridodilatatori. MIC, mușchii iridoconstrictori. PC-C, procese ciliare - cristalin. GO, ganglion oftalmic. N-III-A, o. gangliooar. N-I-A, n. pupilar. N-II-D, n. tecto-spinal. N-III-D, n. spino-simpatic. N-IV, o. ganglio-muscular. N-III, nucleu ganglionar. N-I, n. pupilar. FTS, fasciculus tecto-spinal. CGE, corpii geniculați externi. BCA, brațul conjunctival anterior. TQA, tuberculul cvadrigemen anterior. NP, nucleul Perlia. MEW, nucleul miozei Edinger-Westphal. CIL, coloana intermedio-laterală Clarke.

Fixarea unor detalii ale mișcării duce la apariția stereotipului dinamic în scoarța cerebrală, cu formarea unor relații funcționale ce iau un caracter de automatism, imprimând o anumită „amprantă” de mișcare proprie fiecărui individ care, în ultimă instanță, caracterizează gestica motorie umană, expresie a evoluției lui filogenetice și ontogenetice.

Acte motorii voluntare. Realizarea unor acte motorii voluntare, de la cele mai simple la cele mai complexe, impune o coordonare a mișcărilor inițiate în acest scop, privind succesiunea, distribuția și extinderea lor temporo-spațială, cât și a gradului de adaptare a forței musculare în contextul cerut.

Coordonarea în acest sens, prin intermediul cortexului cerebral, a unor astfel de acte motorii asigură atât declanșarea și susținerea, cât și încetarea mișcărilor voluntare, care, în realizarea lor, parcurg următoarele etape:

- conceperea corticală a mișcării;
- informarea senzitivo-senzorială a scoarței privind plasarea spațială a mișcării, a timpului și secvențelor acestuia, cât și a efortului necesar executării ei;
- transmiterea mesajului efector prin căile motorii centrale și periferice spre dispozitivul activ neuro-muscular;
- mobilizarea dispozitivului pasiv osteo-articular și transmiterea concomitentă, în principal spre cerebel, a informațiilor proprioceptive mio-artrokinetice;
- intervenția sistemului de control motor, în care cerebelul intervine cu o cotă principală, alături de formațiunea reticulată, pentru modularea activității motoneuronilor alfa și gamma.

Dirijată spre un scop precis, o astfel de coordonare este asigurată printr-un mecanism reflex, în parte înăscut și în parte perfecționat în evoluția celor mai diverse deprinderi motrice, până la căpătarea unui caracter de automatism sau „stereotip dinamic”.

Mișcările voluntare sunt diferite în acest sens de cele reflexe de origine medulară, prin aceea că sunt determinate nu numai de stimuli imprevizibili instantanei, dar și prin memorizarea unei experiențe trecute.

Impulsurile nervoase care guvernează mișcările voluntare au originea în neuronii unor anumite zone ale cortexului și sunt dirijate spre etajul medular prin fasciculul piramidal, în majoritate cu fibre încrucișate, astfel încât cortexul stâng controlează mișcările mușchilor de partea dreaptă și vice-versa.

Mușchii feței, în același timp, primesc fibre din ambele jumătăți ale cortexului.

În ultimul timp se acceptă că funcțiile motorii au o distribuție difuză în scoarță, încât impulsul motor necesar pentru realizarea unei mișcări apare într-o zonă corticală întinsă. Dimensiunea ariei corticale care guvernează un grup de mușchi este determinată nu prin volumul acestui ansamblu, ci, mai cu seamă, prin complexitatea acestei funcții, încât un număr mare de neuroni va fi indispensabil mișcărilor, acestea fiind coordonate. Stimularea electrică a zonei motorii a cortexului cerebral provoacă totdeauna mișcări și nu contracții de mușchi izolați, aceasta conducând la ideea unui „cortex care gândește în termeni de mișcare și nu de mușchi”. Acest fapt sugerează multiplele interconexiuni ce se stabilesc între neuronii motori, atât în zona motorie, cât și cu alte arii corticale motorii complementare. De asemenea, există multe interconexiuni

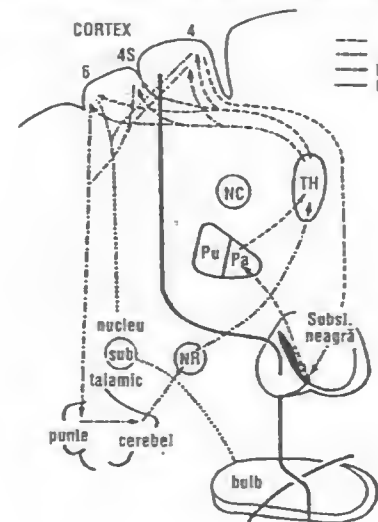


Fig. 19.59. Circuitele modulatorie cortico-subcorticeale ale funcțiilor motorii. 6, 4S, 4, arii motorii corticale. NC, nucleul caudat. Pu, putamen. Pa, pallidum. TH, talamus. NR, nucleolul roșu. IV, fasciculul piramidal. I, II, III, căile cortico-striate.

și cu ariile corticale sensibile, prin care mișcările sunt ajustate după informațiile provenite de pe suprafețe, mușchi și articulații. Numeroase structuri subcorticeale (nucleii cenușii centrali, cerebelul) ar juca, de asemenea, un rol foarte important în reglarea diverselor acte motorii, declanșarea acestora revenindu-i scoarței, iar menținerea și adaptarea ei fiind sub controlul etajelor inferioare ale axului cerebro-spinal (porțiunea inferioară a trunchiului cerebral și măduvă).

La ora actuală, deocamdată, este imposibil de a recunoaște oricărui centru nervos motor luat în parte o funcție specifică responsabilă de realizarea unui anumit tip de mișcare.

În acest sens, diverși centri motori sunt legați între ei prin multiple circuite sub forma unor adevărate „bucle” de control reactiv, încât funcția lor apare, astfel, ca rezultatul unui echilibru dinamic (fig. 19.59).

Aceasta explică, în plus, de ce leziuni cu o topografie diferită ar putea perturba în puncte diferite un același ansamblu funcțional sinergic și să producă, în consecință, un același tip de perturbare motorie, complicând și făcând dificilă diagnosticarea lor.

Funcția corticală „praxică”. Elaborarea în prealabil a unei schițe corespunzătoare oricărui act motor îndreptat spre un anumit scop este asigurată printr-o serie de procese complexe cortico-subcorticeale, în care un rol aparte îi revine etajului cortical implicat direct în funcția definită sub numele de „praxie”.

În cazul unor astfel de acte motorii specializate cu caracter praxic, cum ar fi scrisul sau vorbirea, se acceptă existența unei zone a lobului frontal stâng care ar controla elaborarea lor prin intermediul cortexului motor de ambele părți. Fibrele care leagă cortexul motor stâng ar fi scurte, cele care leagă cortexul motor drept ar traversa corpul calos, încât apraxia motorie s-ar observa după leziuni prefrontale, corticale sau subcorticeale și ale corpului calos.

Expresia limbajului necesită punerea în joc a numeroși mușchi specializați, ca cei ai limbii, laringelui și mâinii. Ariile cortico-motorii ale creierului, fasciculele descendente, motoneuronii trebuie să fie intacte și de funcționalitate normală, încât acțiunea lor să fie controlată într-un mod corespunzător de cerebel, aferențele musculare, labirintice și altele.

Se presupune existența unui centru minor de limbaj pentru vorbire și pentru scriere în lobul prefrontal stâng, în vecinătatea centrilor superiori implicați în mișcările voluntare. Până în prezent nu s-au putut defini și localiza cu precizie centrii limbajului și nici asuma funcții relativ autonome.

Aceste funcții trebuie să fie considerate ca un tot, deopotrivă sub aspectul recepției și expresiei pentru limbajul vorbit și scris.

Centrul vorbirii Broca reprezintă o arie de integrare comună, care controlează tipurile de funcții musculare responsabile de formarea diferitelor sunete de către laringe și gură. Comenzile succesive date de aria Broca difuzează și în regiunile vecine ale cortexului secundar motor, care controlează respirația. În momentul când se produc mișcările laringelui și ale gurii, mușchii respirației se contractă, pentru a regla cantitatea de aer necesară formării sunetelor. Astfel, gândurile sunt formulate în cuvinte (fig. 19.60).

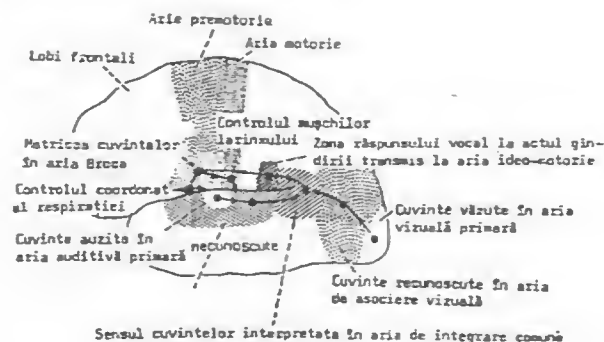


Fig. 19.60. Centrii corticali de integrare motorie a diverselor funcții „praxice” (scrisul, vorbirea etc.).

Lobul temporal, partea posterioară a lobului parietal, inclusiv pliul curb și insula reprezintă, probabil, arii receptoare principale pentru limbaj. Acestea se prelungesc înainte cu o parte a lobului prefrontal, considerat ca origine posibilă a căilor aferente corespunzătoare. Ansamblul acestor zone este legat de activitățile intelectuale superioare.

Leziunile căilor aferente (auditive, vizuale sau proprioceptive) spre ariile cortico-motorii sau ale substanței cenușii cerebrale antrenează o serie de tulburări caracteristice limbajului:

a) cecitatea verbală (incapacitatea de a înțelege cuvintele scrise) ar fi produsă de o leziune interesând centrul vizual al limbajului;

b) anartria (incapacitatea de a articula) sau agrafia (incapacitatea de a scrie) sunt date de leziuni ale căilor care se îndreaptă spre zonele cortico-motorii;

c) disartria este o tulburare a limbajului provenită din leziuni ale ariilor cortico-motorii, ale fasciculului piramidal, ale nucleilor cranieni, ale nervilor cranieni sau ale mușchilor respectivi. Această tulburare de limbaj poate proveni și în cursul rigidității prin tulburări de tonus sau prin pierderea controlului cerebelos asupra activității posturale și voluntare.

Alterarea unor conexiuni intercentrale și periferice prin lezarea unor regiuni corticale poate determina o serie întreagă de perturbări ale actelor motorii voluntare sau praxice, cunoscute sub numele de „ataxii” și, respectiv, „apraxii”.

În cazul ataxiei kinetice, mișcările devin inadecvate scopului propus, printr-o tulburare a coordonărilor, iar în cea posturală tulburările sunt legate de menținerea și reglarea contracției musculare susținute voluntar sau reflex.

În cazul ataxiei motorii, deși există ideea generală a actului motor ce trebuie îndeplinit, acesta nu se poate exterioriza practic prin mișcările corespunzătoare. Dintre acestea amintim apraxia ideomotorie, constructivă, alături de altele speciale sau parțiale, cum ar fi anartria, agrafia etc.

Alte mecanisme motorii corticale implicate în realizarea unor funcții importante, ca cea a echilibrului sau a activității tonice musculare de postură și locomotie, orientare și fonație, sunt prezentate în cadrul tratării celorlalte capitole.

19.13. FIZIOLOGIA SISTEMULUI NERVOS VEGETATIV

Sistemul nervos vegetativ cuprinde totalitatea formațiunilor simpatico-parasimpatice centrale și periferice implicate în reglarea neuro-umorală a funcțiilor viscerale, de întreținere ale organismului.

Denumit inițial sistem nervos autonom sau periferic, pentru a se sublinia relativa sa autonomie față de sistemul nervos central, ulterior s-a precizat că aceasta este, de fapt, una din cele două componente eferente ale sistemului nervos cerebro-spinal. Ca parte eferentă a sistemului nervos, el asigură inervația atât a musculaturii netede din tubul digestiv, cord și vase, căilor respiratorii, urinare și genitale, cât și a teritoriilor glandulare exocrine și endocrine implicate în menținerea în limite normale a constantelor mediului intern.

Termenul „vegetativ” a fost introdus pentru a marca faptul că activitatea viscerelor se găsește sub controlul unui dispozitiv nervos diferit de cel somatic, al vieții de relație. În timp ce segmentul cerebro-spinal somatic întreține sensibilitatea și motilitatea voluntară, sectorul vegetativ al sistemului nervos realizează autoreglarea și adaptarea la necesități a funcțiilor vitale (circulație, respirație, digestie, excreție etc.) prin reacții neuro-reflexe generale și/sau locale. Primul sistem asigură relațiile reciproce dintre organism și mediu, iar cel de-al doilea stabilește legăturile nervoase și umorale dintre organele aceluiași organism.

19.13.1. PARTICULARITĂȚI MORFO-FUNCȚIONALE

Organizarea segmentară a căilor eferente vegetative este, în linii mari, paralelă cu cea a eferențelor somatice. Atât comenzile plecate de la centrii superiori, cât și reacțiile reflexe declanșate de diverși stimuli antrenează ambele căi eferente, punând în stare de activitate simultană mușchii scheletici, pe de o parte, și

viscerele, pe de altă. Astfel, componenta vegetativă asigură suportul visceral al răspunsului somatic. În timp ce fibrele somatice cerebro-spinale deservesc numai formațiunile motorii și senzitive ale somei, filetele nervoase vegetative se găsesc larg răspândite atât la nivelul viscerelor toraco-abdominale, cât și în sectorul somatic (aparatură locomotoră, organe de simț, piele etc.), cu dispoziție plexiformă difuză. La rândul lor, centrii coordonatori ai organelor prevăzute cu funcții vegetative sunt situați nu numai în interiorul nevraxului, ca în cazul centrilor somatici, ci și în afara lui (fig. 19.61).

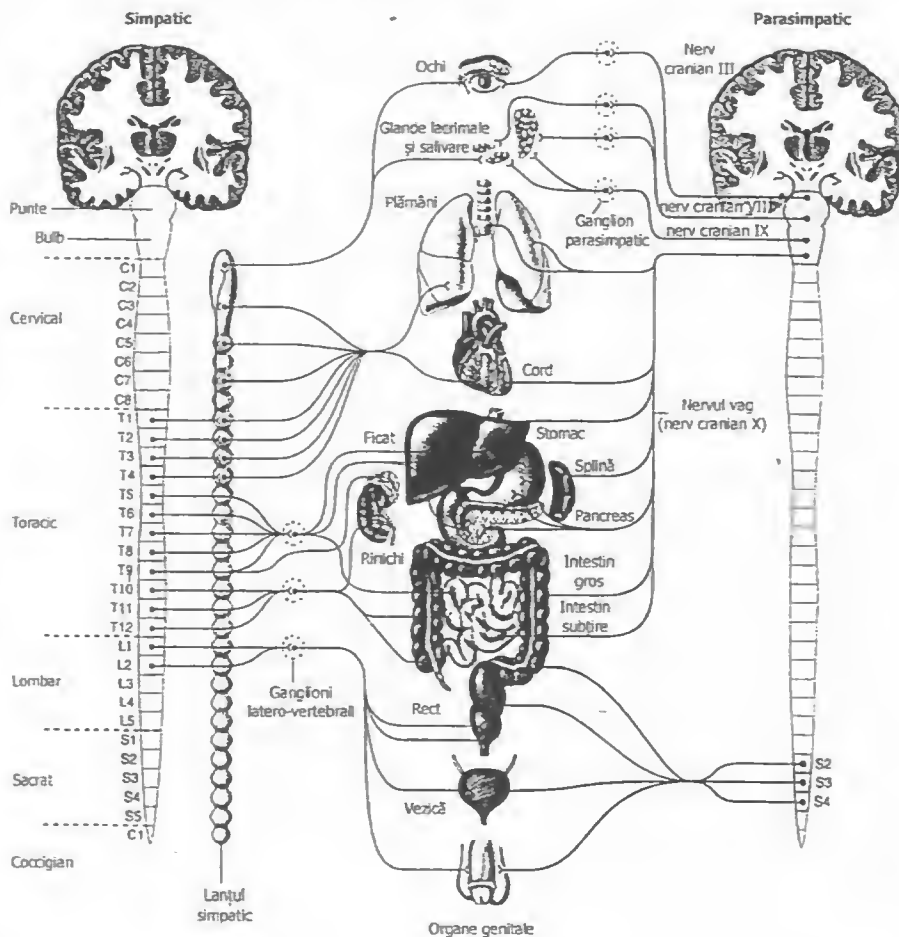


Fig. 19.61. Schema de ansamblu a sistemului nervos vegetativ.

Spre deosebire de calea eferentă simpatico-parasimpatică, formată din doi neuroni vegetativi, calea eferentă somatică este reprezentată de un singur neuron cu sediul în coarnele anterioare ale măduvei spinării.

Pe de altă parte, distribuția intranevraxială a celor două categorii de centri diferă, după cum este vorba de nucleii de origine ai căilor somatice sau vegetative. În primul caz, centrii sunt etajați de-a lungul întregului sistem nervos cerebro-spinal, iar, în cel de-al doilea, predomină în anumite sectoare ale nevraxului, cu localizare specifică pentru nucleii simpatici și parasimpatici.

19.13.1.1. Componenta vegetativă intranevraxială

Aceasta este reprezentată de centrii și căile simpatico-parasimpatică situate la diferite niveluri ale axului cerebro-spinal. Spre deosebire de centrii simpatici, care predomină în hipotalamus și coloana intermedio-laterală a măduvei dorso-lombare, nucleii parasimpatici au sediul cranio-sacrat. Cercetările electro-fiziologice din ultimele decenii au precizat însă că întregul nevrax, de la scoarța cerebrală și până la măduva sacrată, conține numeroase elemente neuronale vegetative, izolate sau grupate sub formă de nucleii simpatici și parasimpatici.

La nivelul scoarței, de exemplu, se găsesc atât zone de proiecție corticală a unor aferențe vegetative, cum sunt cele din vecinătatea ariilor somatice sau din cortexul asociativ, cât și agregate neuronale eferente, cu rol reglator al diferitelor funcții organo-vegetative.

Excitarea electrică a scoarței premotorii și, îndeosebi, a ariilor 6, 8 și 9 provoacă modificări cardio-vasculare și digestive de tip simpatic sau parasimpatic, în funcție de zona stimulată. În general, topografia ariilor vegetative corticale se intrică intim cu aceea a centrilor somatici, atât la nivelul cortexului senzitiv, cât și al celui somato-motor. Datorită acestui fapt, diversele acte motorii se însoțesc de reacții cardiace și vasculare prompte, în vederea pregătirii vegetative și desfășurării în limite normale a actului respectiv. Controlul cortical al funcțiilor vegetative se exercită prin intermediul centrilor organo-vegetativi subcorticali și medulari. Rolul cel mai important, din acest punct de vedere, revine hipotalamusului.

Hipotalamusul, considerat mult timp porțiunea cea mai înalt diferențiată a sistemului nervos vegetativ (creierul vieții vegetative), este sediul centrilor reglatori ai principalelor funcții vitale și endocrinometabolice. Ca centru superior de integrare vegetativă, el primește informații din întregul organism prin fibrele aferente de origine reticulo-spinală, talamică, rinencefalică și corticală, declanșatoare de reacții neuro-endocrine adecvate.

Pe de altă parte, numeroase date experimentale au pus în evidență existența la nivelul hipotalamusului a unui mare număr de centri prevăzuți cu receptori specifici, de tipul termoreceptorilor, osmoreceptorilor, glucoreceptorilor etc. În hipotalamusul anterior, de exemplu, se găsesc centrii trofotropi parasimpatici, vasodilatatori, termolitici și glucostatici, iar în hipotalamusul posterior sunt localizați centrii ergotropi simpatici, vasoconstrictori și termogenetici. La rândul său, hipotalamusul lateral este sediul centrului foamei, stimulator al ingestiei de alimente, cuplat cu centrul sațietății din hipotalamusul median (fig. 19.62).

În plus, la nivelul structurilor neuro-vasculare hipotalamice din pereții ventriculului al III-lea sunt situați centrii dipsogeni, ai ingestiei de apă (organul subfornical și organul vascular al laminei terminale). Stimularea directă sau reflexă a acestora determină reacții neuro-endocrino-metabolice de reglare, adaptare și control al circulației, temperaturii corporale, echilibrului glicemic, balanței hidroelectrolitice, aportului alimentar etc. Prin intermediul lor se realizează reacțiile adaptative cardio-vasculare din cursul efortului fizic, menținerea temperaturii corporale, glucozei sanguine și balanței hidrice în limite constante, precum și reglarea ingestiei de apă și alimente.

Termoreglarea, de exemplu, are la bază participarea simultană și conjunctă atât a centrilor termogenetici din hipotalamusul posterior, cât și a centrilor termolitici din hipotalamusul anterior, cu predominanța unora dintre acestea, după cum organismul este expus la frig, sau la căldură. În timp ce scăderea temperaturii ambiante stimulează centrii termogenetici și-i inhibă pe cei termolitici, creșterea acesteia acționează în sens invers. Cele două categorii de centri termoreglatori hipotalamici formează un adevărat termostat biologic, reglabil atât pe cale sanguină directă, cât și pe cale neuro-reflexă, cu punct de plecare de la nivelul termoreceptorilor periferici sau viscerali.

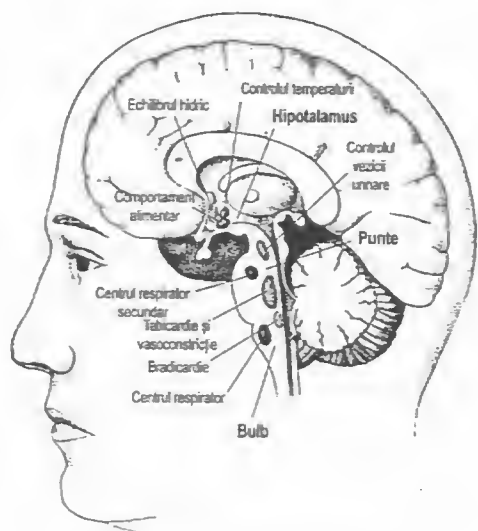


Fig. 19.62. Centrii vegetative hipotalamice.

Centrii termogenetici și termolitici, prezentând conexiuni funcționale cu ceilalți centri organo-vegetativi din hipotalamus și structurile învecinate, concomitent cu reacțiile termice propriu-zise determină modificări cardio-vasculare (vasodilatație sau vasoconstricție periferică), respiratorii (tahipnee) și digestive (sete, salivatie) însoțitoare.

Detaliu privind participarea hipotalamusului la reglarea diverselor funcții somato-vegetative, endocrine-metabolice și comportamentale se găsesc la capitolele respective.

În felul acesta, regiunea hipotalamică constituie o veritabilă răspântie anatomică și funcțională, cu rol coordonator al celor mai variate forme de activitate nervoasă, începând cu autoreglarea marilor funcții ale organismului (circulație, digestie, excreție, reproducere, termoreglare etc.) și sfârșind cu manifestările comportamentale din timpul reacțiilor de adaptare la mediu. Prin nucleii neurosecretori, hipotalamusul controlează activitatea secretorie a hipofizei și a glandelor endocrine subordonate acesteia. La baza conceptului actual de complex hipotalamo-hipofizar stă faptul că, în timp ce hormonii adenohipofizari sunt lansați în circulație cu ajutorul unor factori eliberatori de natură hipotalamică, neurohormonii retrohipofizari sunt sintetizați în hipotalamus și doar depozitați în hipofiza posterioară.

Trunchiul cerebral conține, de asemenea, numeroase structuri vegetative cu rol esențial în menținerea funcțiilor vitale ale organismului. În afara elementelor nervoase de legătură dintre formațiile vegetative supra- și subiacente din substanța reticulată bulbo-mezencefalică, la acest nivel se găsesc atât nucleii de origine ai parasimpaticului cranian de pe traiectul nervilor oculomotor comun (III), facial (VII), glossofaragian (IX) și vag (X), cât și centrii reglării cardio-vasculare, respirației, deglutiției, salivatiei etc. Ca exemplu poate fi dat nucleul vegetativ Edinger-Westphal (pupilar) din mezencefal, cu rol de centru al reflexului fotomotor, sau nucleul lacrimo-muco-nazal din protuberanță, care participă la reglarea neuro-reflexă a secreției lacrimale. Un loc aparte ocupă dispozitivul nervos bulbo-protuberanțial, ce controlează activitatea ritmică respiratorie, precum și nucleul dorsal al vagului din bulb, care asigură inervația parasimpatică a viscerelor toraco-abdominale.

Printre centrii organo-vegetativi bulbari se numără centrii vasomotori, respiratori (inspiratori și expiratori), ai deglutiției, vomei, tusei și strănutului. Activitatea acestora este controlată atât de structurile nervoase supraiacente prin relațiile intercentrale, cât și de stimuli neuro-reflexi periferici sosiți pe diverse căi (nervi depresori, formațiune reticulată etc.) de la nivelul zonelor reflexogene preso- și chemoreceptoare, așa cum s-a arătat la capitolele respective.

Măduva spinării, ca și trunchiul cerebral, prezintă formațiuni vegetative cu rol de conducere și de centri reflexi. În afara neuronilor de origine ai simpaticului dorso-lombar și parasimpaticului sacrat din coloana intermedio-laterală, măduva conține un număr important de centri și nucleii vegetativi cu funcții specializate. Dintre aceștia fac parte centrul midriatic sau pupilodilatator (cilio-spinal Budge), centrii viscerali supra- și subdiafragmatici (adrenalinosecretori, vasoconstrictori, sudorali), precum și centrii reflexi ai defecației, micțiunii, erecției și ejaculării din măduva lombo-sacrată.

19.13.1.2. Componenta vegetativă extranevraxială

Sistemul nervos vegetativ extranevraxial este reprezentat de căile eferente motorii plecate de la nivelul centrilor medulari și formate din doi neuroni, în cazul nervilor simpatico-parasimpatici, contrar căilor eferente somatice în constituția cărora intră un singur neuron extranevraxial (vezi fig. 19.61).

Cei doi neuroni se articulează extranevraxial fie în ganglionii paravertebrali, fie în plexurile ganglionare situate la diferite distanțe de organele efectoare. Excepție face doar glanda medulosuprarenală, care, comportându-se ca un ganglion simpatic mai dezvoltat, este inervată de fibrele preganglionare ale splanhnicului.

Articulația sinaptică vegetativă extranevraxială are loc la distanță de organele efectoare, în cazul neuronilor simpatici, și în apropierea acestora sau chiar paravisceral, în cazul filetelor parasimpatic. Acest fapt, permițând fibrelor nervoase preganglionare simpatic să se articuleze cu un număr mai mare de neuroni postganglionari, explică sfera de acțiune mult mai largă a simpaticului în comparație cu cea a parasimpaticului.

Spre deosebire de componenta toraco-lombară simpatică, reprezentată de ganglionii latero- și prevertebrali, parasimpaticul periferic este reprezentat de fibrele vegetative emise de centrii parasimpatici de la nivelul celor două extremități ale nevraxului. La rândul său, segmentul latero-vertebral al simpaticului este alcătuit din ganglionii situați metameric de o parte și de alta a coloanei vertebrale, în timp ce simpaticul prevertebral conține agregate ganglionare și fibre nervoase eferente dispuse în cea mai mare parte sub formă de rețea plexiformă pe fața anterioară a aortei toraco-abdominale sau a unora din ramurile sale.

Formațiunile ganglionare fac oficiul atât de stație de releu între nucleii vegetativi intranevraxiali și organele subordonate acestora, cât și de centri reflexi periferici. Legătura cu centrii vegetativi medulari se realizează prin ramurile comunicante albe, iar cu sistemul somatic periferic prin ramurile comunicante cenușii (fig. 19.63). Atașându-se în ultimul caz nervului rahidian anterior, corespunzător ganglionului din care au luat naștere, acestea asigură pe calea plexului somatic respectiv (brahial, lombar etc.) conducerea postganglionară a impulsurilor vegetative la vasele musculaturii striate, piloerectorilor, glandelor salivare, sudorale etc.

După denumirea diferitelor segmente ale coloanei vertebrale, cele 22 de perechi de ganglioni ai simpaticului latero-vertebral se împart în: cervicali (3),

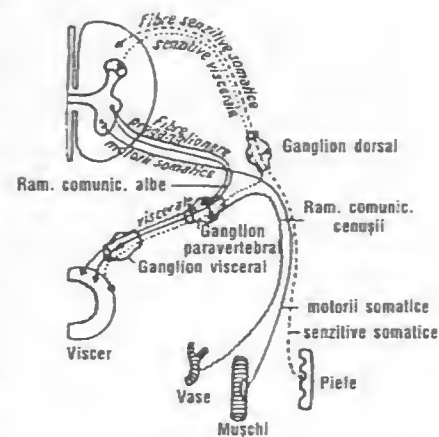


Fig. 19.63. Schema legăturilor simpatic la nivelul măduvei spinării.

toracici (12), lombari (4) și sacrați (3-4), asigurând prin fibrele postganglionare inervația simpatică a organelor și țesuturilor subordonate acestora. Ca și simpaticul, parasimpaticul cranio-sacrat se compune atât din nuclee de origine cefalică (pupilar, salivar superior și inferior, lacrimo-muco-nazal și cardio-pneumo-energie) și sacrată (coloană în torsadă Laruelle), cât și din căi neuro-efectoare ce merg pe traiectul nervilor oculomotor comun, facial, glosfaringian, vag, pelvin și rușinos intern.

19.13.1.3. Dualitatea inervației vegetative eferente

Majoritatea organelor și țesuturilor posedă o dublă inervație vegetativă, reprezentată de filetele postganglionare ale simpaticului dorso-lombar și parasimpaticului cranio-sacrat, cu localizare și distribuție proprie.

În contrast cu sistemul nervos simpatic care se distribuie difuz la toate țesuturile și organele, parasimpaticul controlează teritoriul visceral mai limitat. Ca exemplu poate fi dat parasimpaticul sacrat, care inervează doar sfera pelvină. Arborele vascular periferic și glandele sudoripare, fiind lipsite de terminații parasimpatice, se sustrag influențelor vagale. În schimb, vagul, distribuindu-se organelor efectoare de la nivelul toracelui și abdomenului, suplează lipsa inervației parasimpatice în regiunea toraco-lombară.

În afara nervilor simpatici și parasimpatici propriu-ziși, un rol important revine plexurilor prevertebrale și periviscerale. Acestea sunt entități vegetative cu conținut mixt, atât simpatico-parasimpatic, cât și senzitiv, dispuse în jurul pediculului vascular al diverselor organe sub forma unor conglomerate de ganglioni și fibre nervoase cu rol de conducere sau de centri reflexi. Din prima categorie fac parte plexurile periarteriale, ce poartă numele vaselor pe care le însoțesc (plexurile: carotidian, tiroidian, esofagian etc.), iar din cea de a doua — plexurile prevertebrale propriu-ziși, situate la originea marilor vase toraco-abdominale (plexurile: cardiac, pulmonar, solar, mezenteric, hipogastric etc.).

Plexurile viscerele intramurale sau parietale sunt continuarea plexurilor prevertebrale la nivelul diverselor organe și viscere. Ca și acestea, ele conțin elemente nervoase atât simpatic, cât și parasimpatic, dispuse fie sub formă de rețea perivasculară intraviscerală, fie de butoni terminali la nivelul celulelor efectoare (contractile, secretoare, parenchimatoase etc.). Asemenea plexuri prevăzute cu structuri microganglionare intramurale se găsesc în grosimea mușchiului cardiac și uterin, pereții bronhiilor, uretere, vezică, căi biliare și îndeosebi în musculatura netedă a întregului tub digestiv. Acestea conferă un oarecare grad de autonomie viscerelor respective și explică menținerea activității lor specifice (contractile, secretoare) în condițiile scoaterii din organism și perfuzării cu soluții fiziologice.

Dualitatea inervației vegetative privește și formațiunile nervoase mixte. Se știe că, în afara căilor aferente comune sistemului nervos, somatic și vegetativ, o mare parte din nervii simpatici și parasimpatici sunt nervi micști, cu conținut vegetativ atât eferent, cât și aferent. Astfel de nervi sunt: splanhnicii, vagii, plexurile prevertebrale și perivascularare și chiar unii nervi somatici (ai musculaturii striate, pielii etc.). Indiferent de calea urmată, filetele vegetative centripete conduc informațiile chemo- și presoreceptoare pornite de la nivelul arborizațiilor terminale sau corpusculilor Vater-Pacini din viscere la stațiile organo-vegetative centrale. Căile sensibilității inconștiente viscerele nu pot fi diferențiate anatomic de acelea ale sensibilității somatice.

Fibrele vegetative aferente aparțin fie celulei senzitive în „T” din ganglionii spinali, fie formațiunilor ganglionare ale unor nervi cranieni (ganglionii: jugular, nodos, geniculat etc.). În primul caz, terminațiile dendritice străbat fără întrerupere sinaptică plexurile și ganglionii simpatici latero-vertebrali, pentru a ajunge la rădăcinile posterioare, și ganglionii spinali corespunzători pe calea ramurilor comunicante albe. Prolungirea axonală a acestui prim neuron senzitiv intră prin rădăcina posterioară în măduvă, pentru a se articula fie cu neuronul următor, al căii spino-talamice ce se îndreaptă spre scoarța premotorie (ariile 6 și 8), fie cu rețeaua perpendimă, care conduce aferențele viscerele la centrul organo-vegetativ din formațiunea reticulată bulbo-mezencefalo-diencefalică. Din cauza proiecției corticale punctiforme, sensibilitatea viscerală nu are caracter discriminativ, devenind conștientă numai în cazuri patologice.

În cazul aferențelor senzitive plecate de la nivelul zonelor reflexogene sino-carotidiană și endocardio-aortică, acestea ajung la centrul vasomotor bulbar pe calea nervilor glosfaringian (n. Hering) și vag (n. Ludwig-Cyon), determinând stimularea reflexă a căilor eferente simpatic sau parasimpatic, cu răsunelele cardio-vascular corespunzător.

19.13.2. TRANSMITEREA UMORALĂ ÎN SISTEMUL NERVOS VEGETATIV

Ideea transmiterii umorale a influxului nervos vegetativ este veche. Una din primele referiri la mediația chimică aparține studentului în medicină Elliot (1904), care, constatând că acțiunile adrenalinei se aseamănă cu ale stimulării simpatic, emite ipoteza eliberării unei substanțe de tip adrenalinic în imediata vecinătate a organelor efectoare. În aceeași perioadă, Dale (1906-1914) semnalează efectele de tip vagal ale unor esteri ai colinei și îndeosebi ale acetilcolinei. Postulatul treptei umorale a transmiterii impulsurilor vegetative, emis de Elliot și preluat de Dale, a căpătat suport experimental abia în 1921, când Otto Loewi a descoperit mediația chimică. Stimulând vagul unui cord izolat de broască, Loewi a constatat apariția în lichidul de perfuzie a unei substanțe care reducea activitatea unui al doilea cord perfuzat.

Substanța vagală cardioinhibitoare, denumită inițial *Vagustoff* sau *parasimpatină*, a fost identificată de același autor cu acetilcolina. Ulterior, s-a precizat că aceasta asigură transmiterea excitației nu numai la

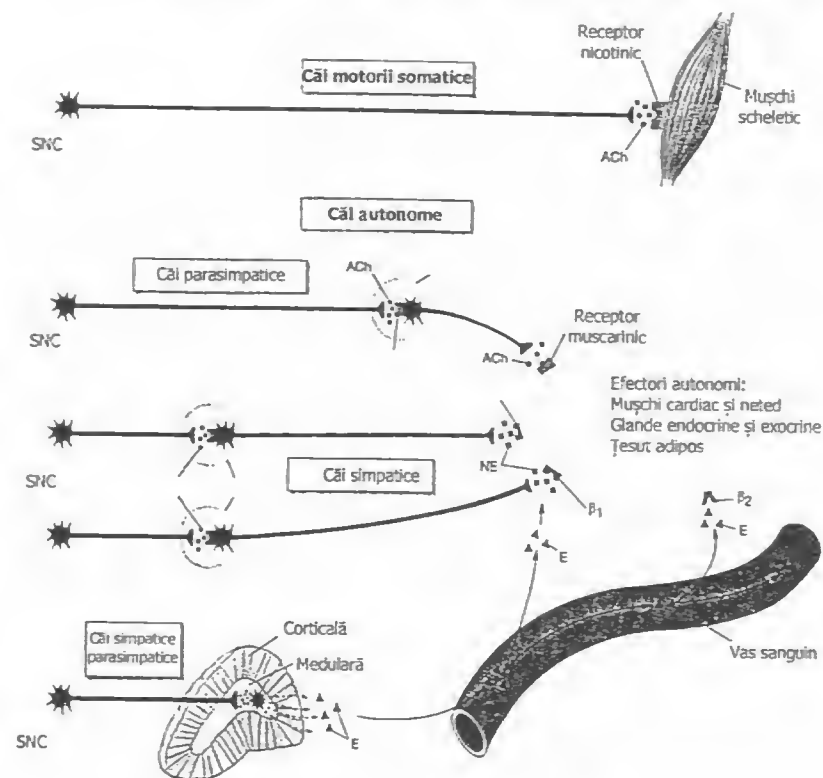


Fig. 19.64 Distribuția mediației colinergice și adrenergice la nivelul căilor vegetative extracerebrale.

nivelul cordului, ci și în celelalte organe inervate de parasimpatic, precum și la nivelul tuturor fibrelor preganglionare simpatico-parasimpatice, al plăcii motorii și unor neuroni postganglionari simpatici. În felul acesta s-a extins rolul acetilcolinei de la terminațiile vagale la transmiterea neuro-umorală ganglionară și neuro-musculară din întregul organism.

Cât privește mediația chimică a fibrelor simpatiche, tot Loewi (1921) aduce, cu ajutorul modelului experimental menționat, dovada eliberării unui factor umoral prevăzut cu acțiuni cardioacceleratoare de tip *adrenalin-like*, pe care-l denumește *Accelerausstoff* sau *simpatină*. În 1947, von Euler demonstrează că principalul mediator al terminațiilor simpatiche postganglionare este noradrenalina, adrenalina având rol mai mult de hormon medulosuprarenal. Glanda medulosuprarenală, comportându-se ca un ganglion simpatic mai dezvoltat, prezintă mediație acetilcolinică. Cele două amine simpatico-adrenergice, denumite și catecolamine, sunt eliberate în diferite condiții fiziologice de predominanță simpatică (efort, agitație, luptă, reacții de apărare, stres psiho-emoțional etc.). În ultimii 30 de ani s-au adunat suficiente dovezi clinico-experimentale în favoarea participării acetilcolinei și a catecolaminelor ca mediatori chimici și la nivelul unor tracturi nervoase centrale.

După criteriul funcțional al mediației chimice reprezentate de acetilcolină sau noradrenalină, formațiunile nervoase vegetative se împart în colinergice și adrenergice. Distribuția celor două tipuri de mediatori chimici la nivelul căilor vegetative extranevraxiale este prezentată în fig. 19.64 (vezi „Mediația chimică la sinapsă” – capitolul 3).

19.13.2.1. Fibre vegetative non-adrenergice și non-colinergice

Aceste fibre au fost puse în evidență la nivelul plexurilor enterice, al coronarelor, căilor urinare și respiratorii, cu ajutorul metodelor histo-fluorescente și electro-fiziologice moderne. Microscopoelectronic, acestea conțin vezicule opace, mari, quinarin-pozitive, de 1 000–1 200 Å, la nivelul butonilor sinaptici. Ele au fost denumite de Burnstock (1979) fibre purinergice, întrucât folosesc ca mediatori chimici ATP și, mai ales, produsul de degradare a acestuia – adenoza. Ca derivați purinici, aceștia îndeplinesc toate cele cinci criterii ale mediației chimice (sinteză și depunere în terminațiile nervoase, eliberare în timpul stimulării, mărirea răspunsului postsinaptic de către substanța injectată, prezența enzimelor care inactivează emițătorul și influențarea prin droguri a răspunsului determinat fie de excitarea nervoasă, fie de substanțele respective). Acțiunea ATP și a adenozei se exercită asupra a două tipuri de receptori specifici, P_1 și P_2 , atât în teritoriul postsinaptic, cât și presinaptic, ca entități distincte sau alături de receptori adrenergici și colinergici. Blocarea acestora poate fi realizată cu metilxantine de tipul teofilinei, eufilinei și cafeinei, în cazul receptorilor P_1 , sau cu chinidină, fentolamină și alte imidazotine, în cazul receptorilor de tipul P_2 . Ambele răspunsuri sunt potențate de către dipiridamol, prin mecanismul inhibării procesului de captare (*uptake*) a adenozei.

Ca și în cazul mediatorilor chimici clasici, derivații purinici par a îndeplini la nivelul diverselor teritorii sinaptice rol dublu, atât de mediatori, cât și de cotransmițători, cu acțiune modulatorie asupra fenomenelor electro-chimice neuro-efectoare. Pe plan funcțional, s-a stabilit că adenoza deprimă manifestările electrice membranare prin creșterea conductanței la K^+ . Ca modulator al mediației chimice simpatico-parasimpatice, adenoza, rezultată din degradarea rapidă a ATP, inhibă eliberarea indusă neurogen de noradrenalină și acetilcolină.

19.13.3. FUNCȚIILE SISTEMULUI NERVOS VEGETATIV

Funcțiile sistemului nervos vegetativ sunt de autoreglare și coordonare reflexă a activității organelor efectoare contractile și secretoare, în vederea menținerii în limite normale a constantelor biologice și adaptării organismului la condițiile variabile impuse de mediul extern sau intern.

Contrar mușchului striat, ca principală structură somatică care declanșează contracții musculare reflexe sau voluntare și care degenerază, devenind incapabil de contracție după denervare, musculatura

netedă a organelor efectoare ale sistemului nervos vegetativ își continuă activitatea bazală după suprimarea inervației extrinseci, datorită plexurilor mienterice viscerele prevăzute cu automatism propriu. Deși activitatea de fond persistă, reacțiile de adaptare la condițiile impuse de mediul ambiant, exprimate prin fenomene de predominanță simpatică sau parasimpatică, devin deficitare sau chiar imposibile. De exemplu, accelerarea bătăilor cardiace, creșterea glicemiei și a fluxului sanguin la nivelul musculaturii striate, caracteristice reacțiilor de apărare și adaptare, nu mai apar la animalul simpatectomizat. Diferite alte forme de suprasolicitare, începând cu efortul fizic și sfârșind cu stresul psiho-emoțional, evidențiază, de asemenea, incapacitatea organismului de a reacționa normal. Cele două componente eferente ale sistemului nervos organo-vegetativ, deși provin din teritorii diferite ale axului cerebro-spinal, asigură inervația dublă și antagonistă a majorității viscerelor, în vederea autoreglării activității lor contractile sau secretorii și întreținerii echilibrului dinamic al funcțiilor respective.

În general, efectele stimulării simpatiche sunt de sens opus celor produse de excitarea parasimpaticului. Dacă una din componente exercită prin veriga chimică mediatore acțiuni inhibitoare asupra unui organ oarecare, cealaltă componentă provoacă răspunsuri inverse din partea organului interesat. Acolo unde mediatorul adrenergic este stimulator, cel colinergic acționează în sens inhibitor, și invers. Regula nu are valoare absolută, întrucât antagonismul simpatic-parasimpatic nu este în unele cazuri adevărat, ci devine interstimulant sau se transformă în veritabil sinergism. Este cazul atât al mediației colinergice ganglionare simpatiche, ca modalitate de declanșare a verigii adrenergice postganglionare, cât și cel al inervației simpatiche a glandelor sudoripare, care acționează prin intermediul acetilcolinei. În plus, câteva teritorii electoare având numai inervație simpatică (membrană nictitantă, vasele cutanate și musculare) sau parasimpatică (insulele Langerhans) își modifică activitatea în funcție de tonusul centrilor respectivi. Printr-un astfel de mecanism se realizează reacțiile vasomotorii periferice de origine centrală, producătoare de paloare sau roșeață a tegumentelor, de tipul eritemului pudic, precum și dereglarea neuro-reflexă centrală a secreției de insulină, produsă de fenomenele de predominanță vagală.

Răspunsurile organelor efectoare la stimularea nervilor simpatico-adrenergici și parasimpatici (colinergici) sunt rezumate în tabelul 19.II.

TABELUL 19.II

Răspunsul organelor efectoare la impulsurile nervoase vegetative

Organele efectoare	Impulsuri adrenergice		Impulsuri colinergice
	Tip de receptor	Răspunsuri	Răspunsuri
1	2	3	4
Ochi			
Mușchi radial, iris	α_1	Contracție (midriază) ++	–
Sfincter irian		–	Contracție (mioză) +++
Mușchi ciliari	β	Relaxare pentru vederea la distanță +	Contracție pentru vederea de aproape +++
Cord			
Nod sino-atrial	β_1	Creșterea frecvenței cardiace ++	Scăderea frecvenței cardiace;
Atrii	β_1	Creșterea contractilității și a vitezei de conducere ++	oprire vagală +++
Nod ario-ventricular	β_1	Creșterea automatismului și a vitezei de conducere ++	Scăderea contractilității (de obicei) și creșterea vitezei de conducere ++
Sistem His-Purkinje	β_1	Creșterea automatismului și a vitezei de conducere ++	Scăderea vitezei de conducere; bloc ario-ventricular +++
Ventricule	β_2	Creșterea contractilității, a vitezei de conducere, a automatismului și a ritmului <i>pacemaker</i> -ilor idioventriculi ++	Efici scăzut
			Ușoară scădere în contractilitate (după unii autori)

TABELUL 19.II (continuare)

1	2	3	4
Arteriole			
Coronare	α, β_2	Constricție ++; dilatare ++	Dilatare ±
Piele și mucoase	α	Constricție +++	Dilatare
Mușchi scheletici	α, β_2	Constricție ++; dilatare ++	Dilatare +
Cerebrale	α	Constricție (ușoară)	Dilatare
Pulmonare	α, β_2	Constricție ++; dilatare	Dilatare
Viscere abdominale; renale	α, β_2	Constricție ++ ++; dilatare +	-
Glande salivare	α	Constricție +++	Dilatare ++
Vene (sistemice)	α, β_2	Constricție ++; dilatare ++	-
Mămă			
Mușchi bronșici	β_2	Relaxare +	Constricție ++
Glande bronșice	α_1	Inhibiție	Stimulare +++
Stomac			
Motilitate și tonus	α, β_2	Scădere (de obicei) +	Creștere +++
Sfinctere	α	Constricție (de obicei) +	Relaxare (de obicei) +
Secreție		Inhibiție (?)	Stimulare +++
Intestin	α, β_1, β_2		
Motilitate și tonus		Scădere +	Creștere +++
Sfinctere		Constricție (de obicei) +	Relaxare (de obicei) +
Secreție		Inhibiție (?)	Stimulare ++
Veziculă biliară și căi biliare	β_2	Relaxare +	Constricție +
Rinichi	β_2	Secreție de renină ++	-
Vezică urinară	β	Relaxare (de obicei) +	Constricție ++ +
Detrusor	α	Constricție ++	Relaxare ++
Trigon și sfincter			
Ureter	α	Creștere (de obicei)	Creștere (?)
Motilitate și tonus	α, β_2	Gravid: constricție (α) +	Variabil
Uter		Negravid: relaxare (β_2)	
Organe genitale masculine	α	Ejaculare +++	Erecție ++ +
Piele			
Mușchi piloerectori	α	Constricție ++	-
Glande sudoripare	α	Secreție localizată +	Secreție generalizată ++ +
Capsulă splenică	α, β_2	Constricție ++ +	-
		relaxare +	
Medulosuprarenală	-	-	Secreție de adrenalină și noradrenalină
Ficat	α, β_2	Glicogenoliză, gluconeogeneză ++ +	Sinteză de glicogen +
Pancreas	α	Secreție scăzută +	Secreție + +
Acini	α_2	Secreție scăzută ++ +	-
Insule (celule)	β_2	Secreție crescută +	-
Cellule adipose	α, β_1	Lipoliză ++ +	-
Glande salivare	α, β	Secreție de apă și potasiu +	Secreție de apă și potasiu ++ +
	β	Secreție de amilază +	
Glande lacrimale	-	-	Secreție ++ +
Glande nazo-faringiene	-	-	Secreție ++
Glandă pineală	β	Sinteză de melatonină	-
Hipofiză posterioară	β_1	Secreție de ADH	-

Din tabel reiese că stimularea colinergică determină la nivelul unor organe efecte inhibitoare, iar, din partea altora, răspunsuri excitatoare. La fel, simpaticul adrenergic apare uneori stimulator, alteori inhibitor. Sensul reacțiilor vegetative simpatico-parasimpatice este imprimat atât de mediatorii chimici eliberați și receptori membranari asupra cărora aceștia acționează, cât și de particularitățile fizico-chimice și metabolice ale celulelor efectoare din teritoriul respectiv.

În paragraful anterior s-a arătat că efectele de un tip sau altul ale stimulării simpatico-parasimpatice au la bază procese neuro-umorale complexe, de eliberare fie a acetilcolinei, fie a catecolaminelor ca primi

mesageri, dublate de acțiunea lor asupra organelor efectoare prin intermediul receptorilor membranari colinergici și adrenergici. Aceștia imprimă, în ultimă instanță, sensul răspunsurilor induse de stimularea simpatică și parasimpatică la nivelul diverselor țesuturi și organe.

În timp ce sistemul nervos simpatic intensifică activitatea organelor implicate în reacțiile catabolice eliberatoare de energie de tip ergotrop, parasimpaticul activează funcțiile viscerelor participante la procesele anabolice de refacere și restabilire a echilibrului, de tip trofotrop (Hess, 1925). Asupra inimii, de exemplu, simpaticul acționează în sens excitator, intensificând toate funcțiile mușchiului cardiac (forță de contracție, frecvență, conducere) prin mecanism beta-adrenergic, pentru a crește aportul de sânge și substanțe nutritive în teritoriul suprasolicitat. Prin același mecanism stimularea nervilor simpatici ai inimii provoacă dilatația coronarelor, în vederea asigurării unui flux sanguin adecvat nevoilor nutritive crescute ale cordului în stare de hiperactivitate. Concomitent, activarea adreno-simpatică dilată musculatura bronșică, pentru a ușura schimburile de gaze dintre organism și mediu. Efectele inverse ale excitării simpaticului toracic asupra inimii și căilor respiratorii nu au încă o explicație satisfăcătoare. Ele țin, desigur, de proprietățile morfologice ale musculaturii celor două teritorii efectoare.

Fiind organe dublu inervate, atât cordul, cât și căile respiratorii inferioare prezintă reacții de sens opus în cazul stimulării parasimpatice. Predominanța vagală se însoțește de deprimarea activității ritmice a inimii și de bronhoconstricție. Oprirea cordului produsă de excitarea electrică a vagului este însă de scurtă durată, datorită fenomenului de scăpare ventriculară (*escape*), care face ca mușchiul cardiac să-și reia activitatea contractilă în plină stimulare vagală. Natura sa pare a fi adrenergică, deoarece nu mai apare la animalul cu cordul spoliat de catecolamine, prin rezepină. În timp ce vagul influențează indirect circulația, prin acțiunea sa cardioinhibitoare, simpaticul joacă un rol hotărâtor în menținerea tonusului vascular general. Prezența fibrelor simpatiche vasoconstrictoare atât la nivelul arterelor mici și mijlocii, cât și în sectorul venos al arborelui vascular asigură adaptarea circulației la nevoile locale și generale ale organismului, în funcție de tonusul centrilor vasomotori și de conținutul în cataboliți acizi ai sângelui. Ori de câte ori presiunea sistemică are tendința la scădere, se produc reacții neuro-reflexe compensatoare, cu participarea predominantă a nervilor simpatico-adrenergici. Acțiunea locală vasoconstrictoare a noradrenalinei eliberate este potențată de lansarea concomitentă în circulație a adrenalinei din glanda medulosuprarenală, sub influența impulsurilor sosite de la centrul vasomotori pe calea marelui splanhnic.

În afara acțiunii simpaticomimetice bine cunoscute, adrenalina provoacă efecte hiperglicemice, atât directe, rezultate din intensificarea glicogenolizei hepatice, cât și indirecte, prin intermediul complexului hipotalamo-hipofizo-corticosuprarenal, eliberator de ACTH și glucocorticoizi. Stimulând indirect secreția de hormoni glucocorticoizi, adrenalina circulă intensifică fenomenul de gluconeogeneză, în vederea refacerii substratului metabolic necesar combustibililor tisulare. Activarea complexului hipotalamo-hipofizo-corticosuprarenal de către adrenalină constituie, de altfel, una din modalitățile principale de antrenare a verigii neuro-endocrino-metabolice la reacțiile ergotrope, nespecifice, de apărare, încadrate de Selye (1946) în sindromul general de adaptare.

Contrar sistemului adreno-simpatic, care acționează în sens catabolizant și consumptiv, parasimpaticul intervine în sens invers, anabolizant. Efectele de tip anabolic și trofotrop ale stimulării parasimpatice sunt mai evidente în teritoriul subdiafragmatic și îndeosebi la nivelul tractului digestiv. La acest nivel, simpaticul este inhibitor și parasimpaticul devine stimulator. În timp ce motilitatea și secrețiile gastro-intestinale sunt activate, respirația și ritmul cardiac scad. La nivelul ficatului, parasimpaticul determină glicogenopexie. Vagotonia din timpul digestiei și somnului favorizează astfel procesele de asimilare și refacere a rezervelor energetice.

Organele excretore (vezică, uretere) își intensifică, de asemenea, motilitatea sub influența excitării parasimpatice. Uterul reacționează variabil, după cum este în stare de graviditate sau vacuitate și, bineînțeles, în funcție de stadiile ciclului estral.

Glandele sudoripare, splina și membrana nictitantă, deși au numai inervație simpatică, reacționează prin contracție atât la substanțele adrenergice, cât și la cele colinergice. La rândul său, pupila se dilată sub influența simpaticului și se micșorează în timpul excitării parasimpatice.

Din exemplele date, rezultă că activitatea multora din organele prevăzute cu funcții vegetative este sub influența modulatorie a inervației simpatico-parasimpatice. Rolul nervilor vegetativi este, deci, hotărâtor și indispensabil nu atât în declanșarea răspunsului, ca în cazul inervației motorii somatice, cât mai ales în

reglarea, coordonarea și adaptarea activității organelor efectoare prevăzute cu funcții vegetative la nevoile de moment ale individului. În modul acesta, componenta vegetativă a sistemului nervos asigură răspunsurile neuro-umorale și endocrino-metabolice adecvate necesităților, permițând organismului să se adapteze la noile condiții și să se comporte ca un tot unitar. Prin același mecanism al reacțiilor neuro-endocrino-metabolice de reglare și control se realizează autoreglarea circulației, respirației, digestiei, excreției, temperaturii corporale și a diverselor metabolisme, asigurând stabilitatea mediului intern, semnalată inițial de Cl. Bernard (1878) și denumită ulterior homeostazie (Cannon, 1932). La baza proceselor homeostazice stau fenomene adaptative de predominanță simpatică sau parasimpatică, produse prin stimularea neuro-reflexă a structurilor vegetative centrale, care – după cum se știe – scapă total sau parțial controlului conștient al scoarței cerebrale. Este cazul reflexelor somato-vegetative: respirator, vasomotor, pupilar, salivar, faringian, vezical, genital etc.

Reacțiile neuro-vegetative compensatoare de autoreglare și control al funcțiilor de întreținere ale organismului sunt precedate de procese complexe de integrare și prelucrare a informațiilor sosite pe căile aferente la nivelul centrilor organo-vegetativi din axul cerebro-spinal. În afara rolului său efector, sistemul nervos vegetativ îndeplinește, astfel, un important rol integrativ la nivel central, care va fi discutat în continuare.

19.13.3.1. Rolul integrativ al sistemului nervos vegetativ

Sistemul nervos vegetativ coordonează și adaptează pe cale nervoasă și umorală activitatea tuturor organelor implicate în menținerea echilibrului dinamice ale funcțiilor vitale. Dacă la periferie căile, locul și modul de acțiune al structurilor nervoase vegetative sunt relativ distincte, la nivelul intranevral al loc fenomenelor de implicare somato-vegetativă de o complexitate deosebită. Cercetările histo-chimice și electro-fiziologice efectuate în ultimele decenii au precizat că elementele vegetative din formațiunea reticulată (FR) a trunchiului cerebral, diencefal, rinencefal și scoarța cerebrală se găsesc morfologic și funcțional în strânsă legătură cu structurile somatice, realizând integrarea complexă a funcțiilor organo-vegetative cu cele ale vieții de relație.

În prezent, dispunem de un volum impresionant de date analitice, referitoare atât la reprezentarea vegetativă nevrală, cât și la distribuția mediației chimice colinergice și adrenergice centrale. Mediația colinergică reprezintă, după Laget (1970), aproximativ 80% în talamus și nucleul caudat, 75% în cerebel, 35% în trunchiul cerebral și 30% în neocortex. La rândul său, mediația adrenergică predomină la nivelul formațiunii reticulate mezencefalo-diencefalice, iar cea serotoninergică în hipotalamus și rinencefal. Prin procese enzimo-chimice insuficient cunoscute, structurile vegetative cerebro-spinale au capacitatea de a integra și prelucra informațiile primite atât pe calea sensibilității specifice talamo-corticale, cât și prin intermediul aferențelor nespecifice ale formațiunii reticulate (FR), în vederea elaborării reacțiilor compensatorii, de adaptare a funcțiilor somato-vegetative la condițiile impuse de mediul extern sau intern.

Componenta vegetativă centrală este reprezentată de centrii și căile nervoase simpatice și parasimpatice, existente de-a lungul întregului nevral, de la scoarța cerebrală și până la măduva sacrată. După Hermann și Cier (1970), centrii nervoși vegetativi sunt de două feluri: de comandă și de integrare. Primii sunt localizați în măduvă, bulb și mezencefal, iar ceilalți în FR, hipotalamus, talamus și scoarța cerebrală. Ei realizează trei modalități de integrare, al căror scop comun este de a armoniza funcțiile vitale și a asigura echilibrul fizice, chimice indispensabile homeostaziei.

Integrarea vegetativă propriu-zisă se realizează cu participare exclusivă simpatico-parasimpatică prin mecanismul antagonismului interstimulant, descris altădată de Danielopolu (1954). Tipic din acest punct de vedere este cazul autoreglării presiunii sanguine.

Cea de a doua formă de integrare este integrarea somato-vegetativă realizată prin interpătrunderea uneia sau a mai multora din funcțiile vegetative cu manifestări ale vieții de relație. Această formă apare cu atât mai complexă, cu cât structurile nervoase care o realizează sunt mai diferențiate, atingând cel mai înalt grad la nivelul scoarței cerebrale, locul proceselor de înaltă diferențiere și integrare.

Prezența centrilor vegetativi în imediata vecinătate a arilor somatice și asociative corticale asigură apariția reacțiilor reflexe vegetative necesare pregătirii și desfășurării în limite normale a diferitelor forme

de activitate cerebrală. Prin acest mecanism, contracția musculaturii striate, de pildă, ca manifestare somatică, se însoțește de vasodilatație locală și aport sanguin crescut, chiar de la începutul activității contractile a mușchiului. Tulburările vasomotorii asociate hemiplegiei de origine corticală sunt, de altfel, clasice, iar modificările pupilare și lăcrimarea din timpul stimulării zonei motorii a mușchilor extrinseci ai ochiului sunt bine cunoscute.

După Guyton (1966), atât cortexul motor, cât și cel premotor ar elabora, în urma integrării și prelucrării aferențelor senzoriale specifice și nespecifice sosite la scoarță, nu numai răspunsuri somatice, ci și vegetative. Excitarea electrică a girusului sigmoid anterior, de exemplu, provoacă efecte presoare și tahicardie de natură adreno-simpatică, în timp ce stimularea circumvoluției suprasilviene produce vasodilatație, hipotensiune, apnee și intensificarea motilității intestinale pe cale parasimpatică.

Numeroase alte arii corticale participă la procesele de integrare superioară somato-vegetativă, caracteristice scoarței cerebrale. În ariile 6, 8 și 9 ale cortexului premotor, au fost puse în evidență grupe de celule nervoase vegetative implicate în reglarea digestiei, sudației și secreției urinare, a căror scoatere din funcțiune determină accelerarea tranzitului intestinal, biperhidroză și tulburări de micțiune. La rândul său, contracția detrusorului și relaxarea sfincterelor este sub controlul centrilor vezicali din lobul paracentral. Un centru stimulator al contracțiilor uterine a fost găsit în partea internă a cortexului motor. Efecte inverse, de inhibare a activității sexuale, se obțin prin excitarea lobului piriform din rinencefal. Împreună cu nucleii amigdaleni, acesta reglează activitatea organelor sexuale și comportamentul alimentar. În timp ce ablația lobului piriform determină hipersexualitate, stimularea amigdalei atrage după sine ingestie de alimente, asemănătoare cu cea produsă de excitarea lobilor olfactivi.

Aceste câteva exemple demonstrează că ariile vegetative corticale sunt implicate profund în integrarea și coordonarea diferitelor forme de activitate somato-vegetativă.

Controlul cortical al funcțiilor vegetative și psiho-emoționale se exercită însă prin intermediul centrilor organo-vegetativi diencefalo-mezencefalice și bulbo-medulari. Locul de primă importanță din acest punct de vedere revine hipotalamusului. Ca principal centru subcortical de integrare vegetativă, hipotalamusul primește informații din întreg organismul, care determină, după caz, fie răspunsuri somato-vegetative motorii sau psiho-afective, fie diferite reacții neuro-endocrine, cu participarea obligatorie a hipotalamusului antero-median, ca loc de formare a factorilor eliberatori ai celor șapte hormoni adenohipofizari.

Interrelațiile neuro-endocrine constituie cea de a treia formă de integrare vegetativă. Majoritatea aferențelor senzoriale specifice și nespecifice influențează (prin intermediul FR și al complexului hipotalamo-hipofizar) secreția glandei hipofize, prin mecanismul activării sau inhibării factorilor de eliberare a tropilor hipofizari, cu răsunset funcțional corespunzător la nivelul glandelor și organelor-țintă. La rândul lor, produșii de secreție ai principalelor glande endocrine controlează activitatea secretorie a hipofizei, prin același mecanism al afectării *releasing*-factorilor de origine hipotalamică, în vederea restabilirii echilibrului. Tipic este cazul ACTH, stimulator al secreției de glucocorticoizi, a cărui lansare în circulație este inhibată de excesul de cortizon sau hidro cortizon circulant, ca urmare a blocării factorului eliberator respectiv din hipotalamus.

Fenomene similare de autoreglare a tropilor hipofizari, cu participarea produșilor de secreție ai glandelor-țintă, pe de o parte, și a factorilor eliberatori hipotalamici, pe de alta, au fost descrise pentru toți hormonii hipofizei anteriori.

Revenind la reacțiile somato-vegetative de natură hipotalamică, este de subliniat că, în timp ce ajustările vasomotorii, sudorale și hidroelectrolitice din termoreglare se realizează pe cale vegetativă simpatico-parasimpatică, frisonul termic este o manifestare pur somatică. La rândul său, comportamentul alimentar controlat de centrii foamei din hipotalamusul lateral antrenează, de asemenea, ambele sectoare ale sistemului nervos. În strânsă conexiune morfo-funcțională cu nucleii simpatici din hipotalamusul posterior se găsesc centrii ergotropi vasoconstrictori, cardioacceleratori și termogenetici. Excitarea lor directă sau reflexă declanșează o gamă variată de fenomene de predominanță simpatică, reprezentate de tahicardie, hipertensiune, midriază și hiperglicemie, însoțite de reacții motorii și afective de agresivitate. Fenomene similare produc descărcările brutale de adrenalină, care, străbătând cu ușurință bariera hemato-encefalică numai la nivelul hipotalamusului posterior, provoacă stimularea FR diencefalice ascendente, din care acesta face parte și, prin intermediul ei, activarea scoarței cerebrale.

Hipotalamusul anterior este, din contră, sediul centrilor trofotropi de natură parasimpatică, prevăzuți cu proprietăți vasodilatatoare termolitice și neurosecrete. Excitarea osmoreceptorilor Verney, din imediata vecinătate a nucleului supraoptic, de către presiunea osmotică crescută a plasmei sanguine determină, pe plan somatic, actul comportamental adecvat procurării și ingestiei de apă, iar, pe plan vegetativ, hipersecreția de hormon antidiuretic în hipotalamusul anterior, care este depozitat doar în retrohipofiză, în vederea lansării în circulație, la nevoie, și restabilirii echilibrului osmotic prin antidiureză. Acesta este un alt exemplu de integrare și activitate somato-vegetativă și endocrină conjunctă, realizată cu participarea obligatorie a hipotalamusului.

Strâns legată morfologic și funcțional de hipotalamus este FR a trunchiului cerebral, al cărei rol integrativ este, de asemenea, bine cunoscut. Prezența centrilor organo-vegetativi în feutrajul polineuronal al căilor nespecifice aferente și eferente reticulare asigură condiții optime de integrare a informațiilor sosite pe cale nervoasă sau umorală, în vederea elaborării reacțiilor comportamentale și vegetative corespunzătoare.

De menționat că, cu cât coborâm spre bulb și măduvă, cu atât rolul de integrare și control neuro-reflex al funcțiilor somato-vegetative este mai limitat. Dacă la nivel mezencefalic componenta somatică este încă suficient de pronunțată, în cazul reflexelor oculo-cefalogice, reglarea circulației cu ajutorul centrilor vasomotori bulbari se realizează prin mecanism neuro-reflexe exclusiv vegetative.

Homeostazia circulatorie este, de exemplu, după cum se știe, consecința reacțiilor reflexe neuro-umorale compensatoare, determinate de variațiile în plus sau în minus ale presiunii și gazelor sanguine. Detectarea acestor variații se face prin zonele reflexogene sino-carotidiană și endocardio-aortică, ale căror elemente sensibile la modificările presionale și de compoziție a sângelui fac oficiul de traductor al semnalelor preso- și chemoreceptoare în influx nervos. În condiții normale, atât hipo-, cât și hipertensiunea de la nivelul zonelor reflexogene provoacă reacții reflexe de sens invers, în vederea restabilirii echilibrului tensionat. Modificând frecvența cardiacă și tonusul vascular, aceste reacții afectează ambii factori implicați în menținerea și adaptarea presiunii sanguine la necesități. Ori de câte ori presiunea cu care sângele circulă prin vasele mari are tendința la scădere, se produc fenomene de predominanță simpatică, reprezentate de tahicardie și vasoconstricție care, crescând debitul cardiac și rezistența periferică, corectează prompt tulburarea circulatorie. Prin acest mecanism neuro-reflex, se evită scăderea presiunii sanguine în timpul trecerii de la clino- la ortostatism, precum și prăbușirile brutale de tensiune în cazul hemoragiilor mici și mijlocii. Dacă, din contră, presiunea cu care sângele ajunge la nivelul zonelor reflexogene depășește valorile normale, apar reacții reflexe de natură parasimpatică, de tip cardioinhibitor și vasodilatator. În modul acesta, presiunea reglează presiunea, așa cum spunea Morat, prin mecanismul conexiunii inverse, al reacțiilor de *feed-back*, iar creșterile din timpul efortului fizic, emoțiilor și suprasolicităților neuro-psihice sunt reduse la minimum.

Acestea sunt doar câteva din exemplele ce se pot da, privind rolul integrativ al sistemului nervos vegetativ. Celelalte aspecte ale autoreglării și adaptării funcțiilor vegetative la solicitările din afara și din interiorul organismului, prin mecanisme neuro-reflexe centrale, au fost prezentate la capitolele consacrate reglărilor neuro-umorale ale marilor funcții.

20. MODALITĂȚI DE FUNCȚIONARE A SISTEMULUI NERVOS

Cei aproximativ 10^{12} neuroni, ca unități structurale, genetice și funcționale ale țesutului nervos, dublați de un număr aproximativ de 10 ori mai mare de celule gliale, sunt prevăzuți cu capacitatea de recepție, conducere, stocare, integrare și prelucrare de informații, în vederea elaborării de reacții reflexe somato-vegetative, somatice voluntare, comportamentale sau ideative. Dispuși sub formă de rețele, circuite sau agregate neuronale, ei intră în construcția căilor aferente senzitivo-senzoriale, a centrilor nervoși și a căilor eferente somatice și vegetative.

La baza funcțiilor diferențiate ale acestora stau particularitățile morfo-funcționale și neurochimice menționate în capitolul consacrat noțiunilor de fiziologie neuronală. Ele asigură transmiterea unidirecțională a informațiilor specifice preluate de la nivelul organelor de simț, suprafeței corporale, viscerelor, zonelor reflexogene sau altor teritorii receptoare la centrul de integrare și răspuns reflex sau voluntar. Stimularea zonelor receptoare poate determina o reacție imediată sau întârziată, ca urmare a stocării informației respective, pentru o durată variabilă, la nivelul centrilor nervoși, până la eliberarea răspunsului. Rețelele sinaptice impun nu numai sensul unic al semnalelor în sistemul nervos, ci realizează și prelucrarea și modularea lor, facilitând sau inhibând transmiterea informației de la un neuron la altul. Răspunsul elaborat de către centrul nervos somatic sau vegetativ ajunge la organele efectoare pe cale nervoasă somato-vegetativă, determinând fie contracția muscularilor scheletice sau netede, fie secreția unor glande exocrine sau endocrine. Cea mai simplă formă de activitate nervoasă este actul reflex.

20.1. ACTIVITATEA REFLEXĂ

Activitatea reflexă poate fi definită ca răspunsul specific involuntar la un stimul senzitivo-senzorial adecvat. Ea are la bază acte reflexe elementare, reprezentate în majoritatea cazurilor de o contracție musculară sau secreție glandulară. Actul reflex constă în transformarea unui stimul senzitivo-senzorial specific într-o reacție efectoare motorie sau secretorie, fără participare conștientă. Conștiența ia act doar de producerea reflexului.

Reacțiile reflexe pot fi innăscute sau dobândite, prin condiționare. Reflexele innăscute sunt caracteristice speciei și invariabile. Ele pot fi simple (monosinaptice, flexie, extensie etc.) sau complexe (polisinaptice, segmentare, intersegmentare etc.).

După tipul receptorilor implicați în declanșarea reacției, reflexele se împart în exteroceptive (tactile, termice, dureroase, vizuale, auditive etc.), proprioceptive (miotatice, osteo-tendinoase) sau interoceptive (baroreceptoare, respiratorii, gastro-intestinale etc.).

Reflexele condiționate se realizează prin asocierea unui stimul absolut (fundamental) cu un stimul indiferent. După un număr de asocieri, stimulul indiferent (condiționat) determină același răspuns reflex ca și excitantul absolut (necondiționat), datorită conexiunii temporare realizate între focarele de excitație ale celor două căi aferente. Producerea reflexelor condiționate necesită participarea etajelor superioare ale sistemului nervos central și, mai ales, a scoarței cerebrale.

Ansamblul neuronal implicat în realizarea unui act reflex poartă numele de arc reflex. Acesta leagă receptorul de efector prin intermediul centrilor reflexi.

20.1.1. ARCUL REFLEX

Arclul reflex elementar este format din următoarele cioci elemente componente:

- receptorul specific diferențiat sau simpla terminație nervoasă liberă;
- uoul sau mai mulți neuroni seozitivi ai căii aferente;
- centrul reflex intra- sau extranevaxial;
- calea eferentă somatică sau vegetativă;
- organul efector muscular sau secretor.

Ca și actul reflex, arclul reflex este înăscut, oecesitând prezeoța și integritatea tuturor elementelor sale constituite.

Cel mai simplu arc reflex este format din doi neuroni, unul senzitiv (afereot), cu corpul celular în ganglion spinal, și altul motor (efereot), cu sediul în coarnele anterioare ale măduvei spioării. Este cazul reflexelor monosinaptice sau mioatice (fig. 20.1).

Majoritatea actelor reflexe se realizează cu participarea mai multor neuroni intercalari, prezentând o latență direct proporțională cu oumărul acestora. Acestea suot reflexele polisinpaptice, ale căror conexiuni ioterneuronale fac posibile reacțiile necesare adaptării la mediu.

Spre deosebire de arclul reflex monosioaptic sau polisinpaptic somatic, arclul reflex vegetativ prezintă și un neuron ganglionar pe traiecul căii efereote. Acesta fragmentează calea eferentă în două segmente, unul preganglionar și altul postganglionar. La nivelul sinapsei ganglionare are loc modularea impulsului efereot vegetativ și concentrarea sau dispersia mesajului nervos, după cum aceasta se găsește în apropiere sau la distanță de organul efector. În general, articulația sinaptică între primul și cel de-al doilea neuron al căii efereote vegetative are loc în imediata vecinătate a teritoriului efector, în cazul căii parasimpaptice, și la distanță de acesta, în cazul eferențelor simpaptice. De aici, efectele mai difuze ale descărcărilor

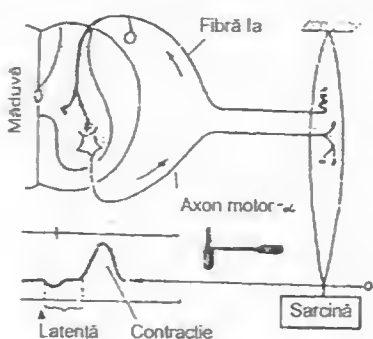


Fig. 20.1. Reflexul monosinaptic.

reflexe simpaptice decât ale celor parasimpaptice. Intensitatea și durata lor depind de excitant și de reactivitatea elementelor constitutive ale arclului reflex.

Receptorii sunt celule diferențiate pentru detectarea și recepționarea variațiilor energetice din ioteriul sau din afara organismului, cu rol de impuls nervos. De regulă, ei sunt sensibili la o singură formă de energie, pe care o transformă în impuls nervos cu modulare de frecvență, în funcție de intensitatea excitantului. Diversele tipuri de receptori, înepând cu terminațiile nervoase libere și sfârșind cu fusurile neuro-musculare, au fost prezentate la căile senzitivo-senzoriale ascendeote. După natura excitantului, receptorii pot fi mecanoreceptori, chemoreceptori, termoreceptori, fotoreceptori, oocceptori (tactili, termici, dureroși), interoceptori (viscerali) și proprioceptori (fusuri oeuo-musculare, corpusculi tendinoși Golgi). Detectarea, preluarea și transformarea informațiilor specifice în influx nervos de către diversele tipuri de receptori se realizează în două moduri.

O primă modalitate este reprezentată de producerea potențialului generator. Acesta apare ca urmare a efectului mecanic sau chimic al excitantului asupra terminației nervoase libere, determinând creșterea permeabilității ionice și depolarizarea membranei propagată electronic până la primul nod Ranvier, unde generează potențialul de acțiune propriu-zis, ca expresie electrică a impulsului nervos.

Cea de-a doua modalitate o constituie potențialul de receptor, determinat prin aceleași feoomene electro-chimice de depolarizare membranară, produse de deformarea sau alterarea chimică a acestuia. Comportându-se ca un veritabil electrod de stimulare, poteoțialul de receptor excită electrotooc terminațiile seozitive din jur. Amplitudinea acestuia este direct proporțională cu intensitatea stimulului, iar durata sa relativ mare permite apariția unor poteoțiale de acțiune repetate la nivelul terminației nervoase și, de aici, de-a lungul căii senzitivo-senzoriale aferente. Ca senzori, traductori ai diverselor

forme de eoergie specifică în influx nervos, receptorii prezioțat un prag de excitabilitate variabil în funcție de particularitățile structurale și întinderea suprafeței receptoare, pe de o parte, și de inteositatea și durata excitantului, pe de alta.

Majoritatea receptorilor prezintă feoomenul de adaptare. Acesta se produce rapid în cazul receptorilor tactili sau al corpusculilor Golgi, apare lent în cazul receptorilor nociceptivi și este inexisteot la nivelul fusurilor neuro-musculare. Primii se mai numesc și receptori fazici, întrucât dau informații doar despre apariția și viteza de producere a unei modificări, iar ultimii sunt denumiți tonici, pentru că aduc informații continue privind relațiile organismului cu mediul.

Căile aferente sunt reprezentate de prelungirile dendritice și axonale ale neuronilor senzitivi, care asigură conducerea ascendentă a informațiilor extero-, intero- și proprioceptive de la nivelul receptorilor spre centrii reflexi. Acestea aparțin fie terminațiilor deodritice ale celulelor pseudounipolare dio ganglionii spinali, fie neuronilor cu nucleii de origie în truochiul cerebral.

Fibrele spioale au prelungiri axonale scurte, ce închid arclul reflex medular, și luogi, de asociație, descendentă sau ascendentă, cu cordoanele medulare de conducere spino-talamo-corticală. Traosmiterea informațiilor la centrii reflexi se realizează saltatoriu, cu viteză mare de conducere, în cazul fibrelor mielice, sau din aproape în aproape, cu viteză mică de conducere, prin fibrele amielinice, ca urmare a binecunoscutelor fenomene electro-chimice de depolarizare și repolarizare membranară. În cazul sumiilor subliminari, aceștia pot atinge pragul de excitație prio sumare temporo-spațială, cu participarea unor circuite reverberante facilitatorii. La oivelul sinapselor ioterneuronale se pot produce fenomene de amplificare, filtrare sau inhibare a aferențelor senzitivo-senzoriale, datorită fie diverselor modalități de articulație a terminațiilor presinaptice cu cele postsinaptice (convergeoță, divergență, reverberație etc.), fie eliberării de mediatori chimici excitatori sau inhibitori. Uneori, oeuronii stimulatori continuă să descarce salve de impulsuri aferente și după îndepărtarea excitantului specific care le-a provocat. Acestea se datorresc fenomenului de postdescărcare, circuitelor în paralel sau circuitelor reverberante, cu durată de la câteva zeci de milisecunde, până la câteva minute sau ore. Starea de veghe poate fi considerată ca exemplu de reverberație a circuitelor neuronale cortico-subcorticeale. În general, durata feoomeoului de reverberație depinde de oboseala sinaptică.

Centrii reflexi au sediul fie extranevaxial, la nivelul ganglionilor vegetativi (para- sau prevertebrali), fie intranevaxial, în măduva spinării, truochiul cerebral sau în ceotrii nervoși superiori. Ei integrează, stochează și prelucrează informațiile primite pe căi nervoase sau umorale aferente și elaborează reacțiile somato-vegetative adecvate, prin mecanisme insuficient cunoscute. În funcție de numărul de interneuroni, centrii reflexi realizează arcui reflexe directe, monosioaptice sau difuze, polisioaptice segmentare și intersegmentare. Din cuantumul de informații specifice sosite la nivelul centrului reflex, numai o mică parte este utilizată la producerea reacției reflexe, restul fiind depozitat în relele sinaptice ale acestuia. Procesul de preluare și engramare a informațiilor la nivel sinaptic este facilitat prio repetarea stimulării senzitivo-senzoriale. După uo număr oarecare de semnale ajunse la nivelul sinapselor, acestea devio atât de facilitate, încât pot reacționa mai intens sau chiar spontan. Asemenea modalități de engramare și răspuns se întâlnesc mai ales la nivelul centrilor reflexi superiori, a căror activitate poate fi stimulată sau inhibată și pe cale reflex-condiționată.

Căile efereote sunt reprezentate de fibrele motorii care asigură contractilitatea mușchilor scheletici, pe de o parte, și ioervația vegetativă a musculaturii netede viscereale și teritoriilor glandulare, pe de altă parte. În cazul reflexelor somatice, calea eferentă este formată dintr-un singur neuron, cu sediul în coarnele anterioare ale măduvei spinării, având ca mediator chimic acetilcolina la nivelul plăcii motorii. Această cale eferentă aparține fibrelor mielice A-alfa cu viteză mare de conducere. În afara sa, calea eferentă somatică conține fibre gamma-motorii, care constituie „bucla gamma”, cu rol contractil asupra extremităților fibrei intrafusale, în vederea reglării și adaptării tonusului muscular bazal la necesitățile variabile ale activității motorii. Primind sub tensiune receptorii anulo-spirali ai fusului neuro-muscular situat în paralel față de fibrele musculare extrasusale, „bucla gamma” stimulează indirect motoneuronul A-alfa și declanșează reflex contracția până la atingerea lungimii predeterminate. Motoneuronii gamma dețin un rol deosebit de important în cazul reflexelor mioatice de postură. La rândul său, calea eferentă vegetativă este bioeurolală, fiind constituită dintr-un neuron simpaptic sau parasimpaptic preganglionar și altul postganglionar, corespunzător fiecăreia din cele două căi vegetative (fig. 20.2).

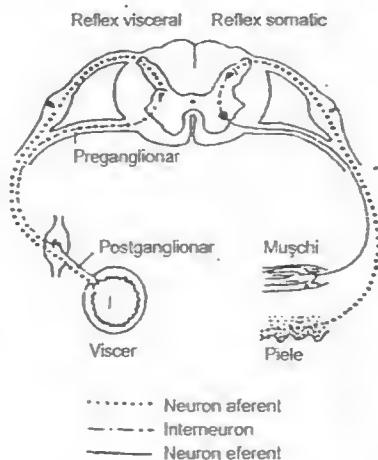


Fig. 20.2. Căile aferente și eferente ale reflexelor somatice și vegetative.

În organele prevăzute cu funcții vegetative există ambele tipuri de receptori, atât colinergici, cât și adrenergici. La rândul lor, receptori colinergici și adrenergici sunt de două feluri: muscarinici și nicotinici, și, respectiv, alfa- și beta-adrenergici, prevăzuți cu proprietăți reactive antagoniste. În afara receptorilor specifici mediației colinergice și adrenergice clasice, suprafața membranelor a celulelor efectoare viscerele este burată cu formațiuni receptoare pentru diverse alte substanțe biologice active (serotonină, histamină, prostaglandine, peptide, purine etc.), cu rol activator sau inhibitor. În felul acesta, reacțiile reflexe ale organelor efectoare depind nu numai de cantitatea de mediator chimic eliberat de la nivelul terminațiilor nervoase ale căii eferente, ci și de gradul de participare a substanțelor modulatorie locale și generale.

20.1.2. PROPRIETĂȚILE FUNDAMENTALE ALE REFLEXELOR

Reflexele somatice și vegetative posedă o serie de proprietăți fundamentale ce țin fie de caracterele generale ale transmiterii sinaptice, fie de organizarea funcțională a arcului reflex.

Unidirecționalitatea este proprietatea care asigură direcția propagării într-un singur sens a influxului nervos la nivelul articulației sinaptice interneuronale, și anume din teritoriul presinaptic spre cel postsinaptic. Grație acestei proprietăți, impulsul nervos se transmite în sens centripet, prin fibrele senzitive, și centrifug, prin fibrele motorii somatice și vegetative. Astfel, informațiile senzitivo-senzoriale plecate de la nivelul receptorilor ajung la centrul reflecției, și de aici, la organele efectoare, determinând reacțiile corespunzătoare.

Latența arcului reflex are la bază fenomenul de întârziere sinaptică, cumulat cu timpul de conducere aferentă și eferentă. Acestea depind de numărul sinapselor și neuronilor traversați de influxul nervos. Dacă timpul de latență al reflexului monosinaptic este numai de 0,5–0,7 ms, el poate atinge 100 ms în cazul reflexului controlateral de flexiune.

Fatigabilitatea este consecința reducerii sau epuizării mediatorului chimic la nivelul releelor sinaptice ale arcului reflex, datorită fie eliberării excesive, fie refacerii lente a acestuia. În comparație cu teritoriul fragil sinaptic, căile nervoase aferente și eferente sunt mult mai rezistente atât la suprasolicități, cât și la toxicele endogene sau exogene.

Mediația chimică interneuronală este asigurată de acetilcolină atât la nivelul ganglionilor parasimpatici, cât și al celor simpatici.

Spre deosebire de teritoriul preganglionar, neuronii postganglionari ai căii eferente vegetative folosesc mediatori chimici diferiți, acetilcolina la nivelul terminațiilor parasimpatice și noradrenalina sau dopamina ca neurotransmițători simpatici. Astfel, în timp ce acetilcolina face oficiul de mediator chimic colinergic atât la nivelul plăcii motorii, cât și în ganglionii vegetativi simpatico-parasimpatici și terminațiile parasimpatice postganglionare, noradrenalina sau dopamina asigură mediația chimică adrenergică numai în teritoriul terminațiilor fibrelor postganglionare simpatici. Sensul și durata reacțiilor reflexe somatice și vegetative motorii sau secretorii depind atât de complexitatea și reactivitatea arcului reflex, cât și de a organului efector.

Organele efectoare sunt reprezentate de musculatura scheletică, în cazul reflexelor somatice, și de fibrele musculare netede viscerele sau celulele secretoare glandulare, în cazul reflexelor vegetative. Răspunsurile acestora depind de tipul și densitatea receptorilor specifici de la nivelul suprafețelor membranelor ale organelor respective. Dacă la nivelul fibrelor musculare striate se găsesc numai receptori colinergici predominant nicotinici,

Sumația temporo-spațială constă în însumarea stimulilor subliminari în timp și spațiu, în vederea transformării lor în stimuli eficienți. În cazul sumației temporale, stimulii afereți separați, ineficienți prin ei înșiși, provoacă o stare de excitație latentă, care, sumându-se cu efectele de același tip ale stimulilor următori, determină în final apariția impulsului eeros. Pentru ca fenomenul de sumație temporală să aibă loc, este necesar ca intervalul între stimuli să nu depășească 10–15 ms. Sumația spațială se referă la însumarea a doi sau mai mulți stimuli subliminari sosiți simultan pe căi diferite la nivelul aceluiași neuron. Prin fenomene de sumație spațială se realizează convergența, facilitarea sau ocluzia undei de excitație la nivelul centrilor reflecției.

Convergența și divergența sunt modalități de concentrare sau disipare a influxului nervos interneuronal. În cazul coconvergenței, același neuron poate primi pe căi sinaptice conexe informații simultane de la mai mulți neuroni. Acestea sunt integrate la nivelul neuronului efector, determinând caracteristicile răspunsului elaborat și transmis pe o cale comună finală spre organele efectoare. Ca exemplu poate fi dat neuronul motor din coarnele anterioare ale măduvei, la nivelul căruia converg fibre nervoase atât cortico-spinale, cât și senzitive și somato-senzoriale. Fenomene inverse de divergență pot avea loc la nivelul releelor sinaptice interneuronale. Acestea realizează activarea unui mare număr de neuroni efectori sau intercalari de către stimulul unic presinaptic. Fenomenele de coconvergență și divergență de la nivel medular sunt ilustrate în fig. 20.3.

Facilitarea și ocluzia sunt proprietăți induse pozitiv sau negativ asupra neuronilor postsinaptici de către semnalele presinaptice. Când influxul nervos trece de la un neuron presinaptic în teritoriul postsinaptic al unui *pool* (complex) neuronal, o parte din neuronii postsinaptici nu sunt stimulați suficient pentru a atinge pragul de excitație. Aceștia rămân în zona facilitată, subliminară, și devin activi, ulterior, prin sumație temporo-spațială. Stimularea puternică a unei căi presinaptice poate, din contră, împiedica răspunsul neuronilor postsinaptici situați în zona de descărcare simultană a neuronului învecinat. Fenomenul apare, de regulă, la locul de suprapunere a celor două zone de descărcare și poartă numele de ocluzie. El trebuie diferențiat de inhibiție, întrucât are la bază interacțiunea dintre două sinapse excitatoare, fără participarea unui neuron inhibitor de tipul celulelor Renshaw medulare.

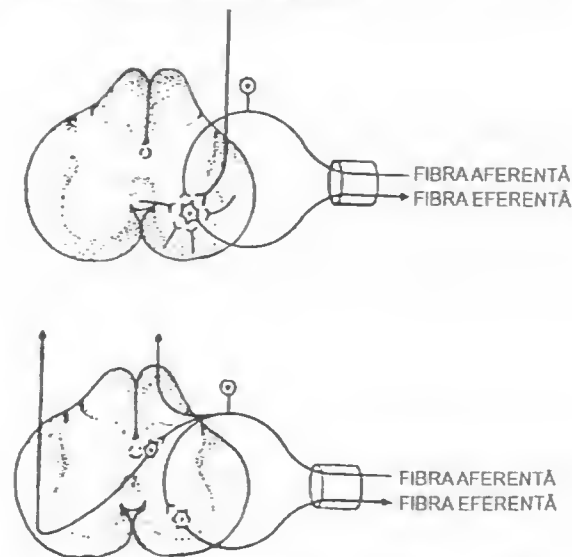


Fig. 20.3. Fenomenele de convergență și divergență la nivel medular.

Iradieria se datorește propagării excitației prin neuronii intercalari și căile de asociație la distanță de locul excitării. Cu cât excitația aferentă este mai puternică, cu atât va cuprinde un număr mai mare de segmente medulare. Pe această bază, Pflüger a descris legile iradierii reflexelor somatice (legile: localizării, unilateralității, simetriei și generalizării), în funcție de intensitatea excitantului.

Sediul reflexelor somatice și vegetative la nivelul diverselor segmente ale axului cerebro-spinal a fost stabilit pe baza observațiilor clinice verificate cu ajutorul unor preparate experimentale adecvate. În cazul reflexelor medulare, de exemplu, s-a folosit animalul spinalizat sau decerebrat, în vederea îndepărtării influențelor supraiacente, cerebrale. Secționarea măduvei spinării la nivelul primelor vertebre cervicale, practică la animalele spinale, determină o perioadă variabilă (de ore sau zile) de inhibiție medulară, urmată de reluarea reflectivității, permițând astfel studiul reflexelor cu sediul exclusiv medular. La rândul său, secțiunea intercolică de la animalele decerebrate, suprimând influențele descendente inhibitoare ale nucleilor bazali, provoacă exacerbarea reacțiilor reflexe medulare, mai ales antigravitaționale.

În felul acesta, s-a precizat rolul reflexelor somato-motorii medulare în asigurarea posturii și tonusului muscular, în general.

Tonusul postural, ca stare de contracție parțială a mușchilor care asigură menținerea poziției normale a corpului în repaus și mișcare, este rezultatul echilibrului dinamic dintre circuitele tonigene aferente (fus neuro-muscular, organ tendinos Golgi) și eferente (neuron motor A-alfa, „bucă gamma”) medulare, modulate permanent de formațiunile nervoase supramedulare. Acestea intervin fie neuro-reflex, fie voluntar, după cum este vorba de influențe subcorticale (din trunchiul cerebral, nucleii bazali, cerebel) sau corticale.

În afara reflexelor posturale și statokinetice, la nivelul trunchiului cerebral și diencefalului se găsesc centrii reflecși reglatori ai principalelor funcții organo-vegetative și endocrine. Cu cât centrii respectivi sunt situați mai superior, cu atât capacitatea lor de integrare și elaborare a reacțiilor neuro-reflexe apare mai complexă. La nivel medular, având loc procese de integrare inferioară a aferențelor somato-vegetative periferice, reacțiile reflexe sunt elementare.

20.2. REFLEXELE SOMATICE MEDULARE

În afara funcției de conducere ascendentă și descendentă anterior prezentate, măduva spinării este sediul unor importante reflexe somatice și vegetative. Din prima categorie a reflexelor somatice fac parte reflexele monosinaptice și plurisinaptice. În timp ce reflexele monosinaptice au la bază doar doi neuroni și o singură articulație sinaptică la nivel medular, reflexele plurisinaptice prezintă doi sau mai mulți neuroni intercalari. După receptorul care inițiază răspunsul somato-motor medular, reflexele somatice pot fi împărțite în proprioceptive și exteroceptive. În cazul reflexelor medulare proprioceptive, receptorii sunt situați în mușchiul însuși, iar stimularea lor se realizează prin întinderea sau scurtarea fusurilor neuro-musculare. Reflexele somatice exteroceptive, din contră, au teritoriul receptor în afara mușchiului, în zonele tegumentare sau mucoase și constau în reacții de retragere și apărare față de un agent nociv oarecare (înțepătură, arsură, curent electric etc.). De aceea, reflexele somatice exteroceptive sunt denumite și nociceptive.

20.2.1. REFLEXELE MEDULARE MONOSINAPTICE

Din categoria reflexelor somatice monosinaptice formate doar din doi neuroni fac parte reflexele miotatice. Acestea sunt reflexe osteo-tendinoase de întindere și extensie ce produc contracția unui mușchi, ca urmare a întinderii lui și tensionării fusului neuro-muscular (Kühne), concomitentă cu cea a fibrelor musculare extrafusale. Întinderea este transmisă la centrul reflex medular pe calea fibrelor mielinice aferente cu diametru mare și conducere rapidă, aparținând grupului I din rădăcinile dorsale. Acestea se articulează monosinaptic cu neuronii motori care inervează același mușchi, determinând răspunsul reflex

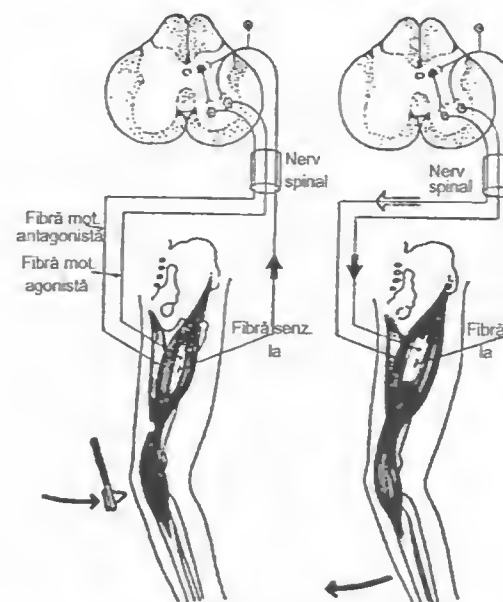


Fig. 20.4. Reflexul rotulian.

contractil după o perioadă de latență doar de 1-3 milisecunde. Extensia gambei pe coapsă, produsă de contracția cvadricepsului în urma percuției tendonului rotulian, se realizează prin acest mecanism (fig. 20.4). Percuția tendonului Achile provoacă, de asemenea, pe cale reflexă monosinaptică, contracția tricepsului sural și extensia labei piciorului pe gambă. În timpul contracției, fusurile neuro-musculare se relaxează, ducând la încetarea stimulării reflexe miotatice, fapt ce explică durata scurtă a reflexului. În general, tensionarea tendonului muscular reprezintă excitantul fiziologic al reflexului miotatic. La producerea acestuia participă atât filetele nervoase terminale anulo-spirale ale fusurilor neuro-musculare, cât și organul tendinos Golgi dispus în serie față de fibrele musculare extrafusale. Creșterea tensiunii în tendon în timpul contracției musculare, activând pasiv receptorii tendinoși Golgi, determină, pe calea fibrelor aferente aparținând grupului Ib, activarea neuronului motor medular și contracția mușchiului respectiv, în vederea întreținerii tonusului muscular. Ca elemente receptoare ale arcului reflex miotatic participă și corpusculii Vater-Pacini, precum și terminațiile nervoase libere din capsula articulară și sinovială.

Referitor la zona striată a extremității fusurilor neuro-musculare, se știe că aceasta este sub controlul nervos al fibrelor gamma-eferente, a căror activare determină, prin contracția fibrelor musculare fusale, și creșterea sensibilității receptorilor anulo-spirali la întindere. Prin intermediul fibrelor gamma, reflexele miotatice (osteotendinoase) pot fi influențate de impulsurile nervoase supraspinale, anxietate, durere etc. Clasic este cazul exagerării reflexului rotulian în timpul manevrei Jendrassik (efortul de îndepărtare a mâinilor împreunate).

Lipsa neuronului intercalar conferă reflexelor miotatice o serie de proprietăți caracteristice. Astfel, spre deosebire de celelalte reflexe, acestea nu prezintă fenomenul de adaptare a receptorilor la excitantul specific, întinderea. Datorită acestui fapt, reflexul miotatic menține neschimbată lungimea mușchiului și, respectiv, poziția normală a membrului.

Adaptarea la întindere ar fi urmată de scăderea tonusului muscular și tulburarea profundă a funcției motorii. Luptând împotriva lungirii mușchilor extensori prin forța gravitației, reflexele miotatice participă la menținerea tonusului postural. Pentru acest motiv, reflexele miotatice se mai oumesce și antigravitaționale.

Sub influența gravitației, genunchii tind să se îndoiască, ducând la prăbușirea corpului. Îndoirea genunchilor are însă ca efect alungirea cvadricepsului, urmată de declanșarea reflexului miotatic, care readuce membrul la poziția de extensie inițială. Întinderea constituind excitantul fiziologic al reflexelor miotatice, rolul acestora în menținerea tonusului muscular devine esențial pentru asigurarea posturii și efectuarea diverselor acte motorii. Secționarea rădăcinilor posterioare sau anterioare duce la dispariția reflexului miotatic și a tonusului muscular. Funcția tonigenă a acestui reflex nu ține însă numai de integritatea lui anatomică, ci și de influențele facilitatoare sau inhibitoare exercitate de formațiunile nervoase supramedulare asupra neuronilor motori periferici de tip A-alfa și gamma. Adaptarea fină și adecvată a tonusului muscular la nevoile variabile ale organismului este, așadar, rezultatul acțiunii complexe cerebro-spinale, cu participarea indispensabilă a reflexelor miotatice medulare. În afara reflexelor rotulian și achilian meoționate, din această categorie fac parte reflexele bicipital, tricipital, maseterin etc. În cazul reflexului bicipital, percuția tendonului bicepsului la plica cotului provoacă flexia antebrațului pe braț. Percuția inserției olecraniceae a tricepsului declanșează reflexul tricipital, de extensie a antebrațului pe braț. Reflexul maseterin constă în contracția mușchilor ridicători ai mandibulei, produsă de percuția mentonului, ca urmare a excitării centrilor neuro-reflexi din trunchiul cerebral.

Datorită structurii lor bineoale și monosinaptice, reflexele miotatice au perioadă de latență scurtă, nu iradiază și sunt lipsite de postdescărcare, sumație și ocluzie. În același mod se explică rezistența mare a acestor reflexe la oboseală.

Explorarea clinică a reflexelor miotatice se face percutând tendonul unui mușchi oarecare și urmărind contracția sa reflexă. În general, toți mușchii răspund la întinderea provocată de percuție, dar nu în măsură egală. Răspunsurile cele mai evidente apar în cazul mușchilor antigravitaționali, cum sunt extensorii membrelor, ridicătorii mandibulei etc. Acestea pot fi înregistrate cu ajutorul reflexografelor de diferite tipuri sau al electromiografelor. Una din modalitățile curente de explorare electromiografică a reflexelor monosinaptice la om o constituie înregistrarea reflexului Hoffman (reflexul H), produs de excitarea electrică a nervului popliteu la nivelul mușchiului gastrocnemian.

20.2.2. REFLEXELE MEDULARE POLISINAPTICE

Reflexele polisinpaptice medulare prezintă două sau mai multe sinapse interneuronale la nivelul centrului reflex medular. Din această categorie fac parte atât reflexele segmentare de flexiune, extensie (simplă și încrucișată) și cutanate (abdominal, cremasterian, plantar), cât și reflexele intersegmentare de scărpănare, ștergere, pășire etc.

Reflexul de flexiune este un reflex exteroceptiv de apărare, ce constă din retragerea prin flectare a segmentului de membru excitat de către un stimul nociv. Arcul reflex respectiv conține cel puțin trei neuroni, dintre care măcar unul face oficiul de neuron intercalar. Aplicarea excitantului nociv (înțepătură, arsură, ciupire etc.) determină contracția mușchilor flexori și inhibiția extensorilor membrului agresionat. Răspunsul reflex este proporțional cu intensitatea excitantului, fiind mult mai limitat în cazul stimulilor slabi decât ai celor puternici. După întreruperea excitației nocive, membrul sau segmentul respectiv nu revine imediat la poziția inițială, ci rămâne flectat un timp oarecare, datorită fenomenului de postdescărcare sinaptică medulară. La aceste particularități se adaugă tendința la iradiere, cu prinderea uneori a întregii extremități, și durata relativ mare a răspunsului reflex. Reflexul de flexiune prezintă fenomenele de sumație, ocluzie, postdescărcare și inducție spinală. Latența sa variază între 8 și 12 milisecunde din cauza atât a conducerii aferente mai lente prin fibrele senzitive mielinice A-delta și amielinice C, cât și a întârzierii polisinpaptice medulare.

Reflexul de extensie poate fi provocat nu numai prin stimularea fusurilor neuro-musculare ale mușchiului tensionat, caracteristică reflexelor proprioceptive, ci și prin simpla atingere sau presiune ușoară exercitată asupra unor zone exteroceptive de contact cu suprafețe dure. Tipic, din acest punct de vedere, este

reflexul static de extindere a labei de pisică, produs de stimularea cutanată, de presiunea sau contactul regiunii plantare (perniței) cu un corp oarecare. Acest reflex suplimentar de extindere poartă denumirea de *reacția de magnet*, grație atracției aparente pe care o exercită corpul cu care a fost excitată laba. În realitate, este vorba de o reacție reflexă motorie indispensabilă staticii și mersului.

În timp ce excitația mecanică a labei determină reflexul de extindere pentru a asigura poziția normală a corpului și mersul, stimularea electrică a acesteia provoacă reacția inversă de flectare și retragere din calea agentului nociv. De aici, prudența cu care trebuie interpretate reacțiile reflexe produse de curentul electric în comparație cu stimulii naturali și dificultățile de extrapolare a rezultatelor, întrucât semnificația funcțională a excitanților apare diferită.

Reflexul de extensie încrucișată (fig. 20.5) este manifestarea controlaterală a reflexului de retragere (*flexiune*) și constă în contracția mușchilor extensori ai unui membru în urma excitării căii aferente de partea opusă. De fiecare dată când unul din membrele inferioare este obligat să se retragă prin reflex de *flexiune*, extensorii celui alt membru se contractă, pentru a asigura stațiunea bipedă. Stimularea nocivă a unei labe la pisica spinală provoacă flexiune ipsilaterală și extensie controlaterală. La om, extensia membrului inferior controlateral asigură suportul greutății corporale în timpul retragerii membrului ipsilateral.

Reflexul de extensie încrucișată, fiind un reflex cu mulți neuroni intercalari, are latență mare, de 40–100 de milisecunde. Ca și reflexul de flexiune, este prevăzut cu proprietăți de iradiere, sumație, inducție și postdescărcare. În plus, reflexul de extensie încrucișată prezintă fenomenul de recrutare, reprezentat prin intrarea progresivă în stare de excitație a neuronilor intercalari. Datorită acestor proprietăți, răspunsul reflex apare lent, ca urmare a descărcărilor succesive și antrenării treptate în procesul de contracție a unui număr din ce în ce mai mare de unități motorii. Mecanismul intim de producere a reflexului de extensie încrucișată nu este decât parțial cunoscut. El ține de tipul fibrelor senzitive cutanate și de prezența celulelor inhibitoare Renshaw în măduvă. Se știe că, spre deosebire de flexiune, fibrele A-delta și C provoacă extensie încrucișată. De asemenea, este cunoscut că stimularea celulelor intercalare Renshaw de către neuroni motori ai unui grup muscular determină inhibarea neuronilor care inervează mușchii antagoniști.

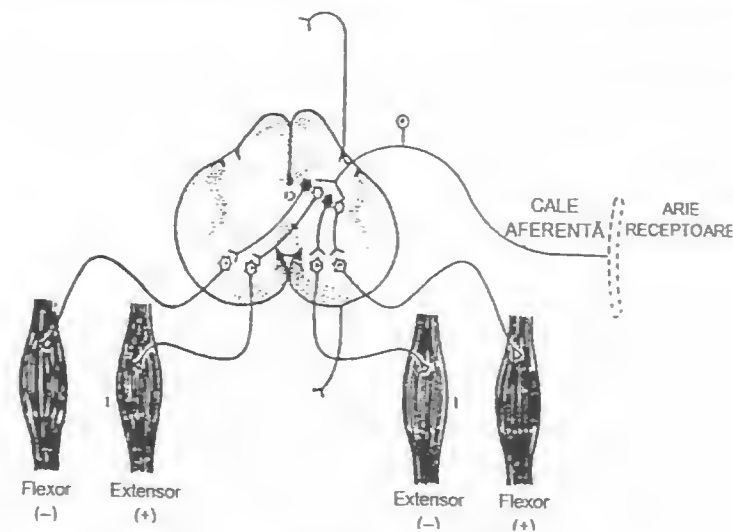


Fig. 20.5. Reflexul de extensie încrucișată.

În anumite stări patologice sau la animalul decerebrat cu tonusul crescut al mușchilor extensori (rigiditatea extensorilor), se produce reflexul de flexiune bruscă, după o perioadă de creștere progresivă a rezistenței la flexiunea forțată, denumit impropriu „reflexul de închidere a briceagului”. Acesta este un reflex invers, de destindere după o contracție exagerată, atribuit descărcărilor aferente ale fibrelor Ib plecate de la nivelul organului tendinos Golgi, cu efect stimulator asupra neuronilor motori ai mușchilor flexori și inhibitor asupra extensorilor. Reflexul invers, de destindere, înlătură pericolul rupturilor musculare. Reacțiile reflexe pot apărea inversate controlateral, ca urmare a iradierii stimulului neuro-reflex și inervației reciproce, determinând facilitarea mușchilor extensori însoțită de inhibarea flexorilor (reflexul Phillipson).

Alternanța ritmică a reflexelor de flexiune și extensie încrucișată asigură mersul și alergarea. La baza lor stă reflexul de pășire, care este un reflex somatic lung.

Reflexul de pășire, ca reflex intersegmentar, se realizează prin fenomene de inducție spinală succesivă negativă și pozitivă. În esență, este vorba de declanșarea unor reflexe neuro-motorii care, la rândul lor, facilitează apariția altora, de sens opus. Întinderea, ca excitant fiziologic al reacțiilor musculare reflexe, producând o mai mare tensiune reflexă în mușchii extensori decât la nivelul flexorilor, asigură atât postura, cât și declanșarea succesivă a reflexelor de flexiune și extensie simplă sau încrucișată, în vederea realizării reflexului elementar de pășire. Sub influența declanșatoare și coordonatoare a structurilor nervoase supramedulare, devine posibilă locomoția (mersul, alergarea etc.). Din aceeași categorie a reflexelor intersegmentare lungi fac parte reflexele de ștergere, scărpinare și coordonare a mișcărilor mâinilor cu ale picioarelor în timpul mersului și alergării. La baza acestor reflexe stau arcuri neuro-reflexe complexe, care interesează un mare număr de centri medulari situați la diferite niveluri ale măduvei spinării. Reacțiile reflexe se produc cu participarea unui număr variabil de mușchi flexori și extensori. În cazul reflexelor de apropiere a membrului și de scărpinare, de exemplu, intervin la câine aproximativ 36 de mușchi.

Reflexele cutanate constau în contracția reflexă a mușchilor de sub regiunea cutanată excitată sau din apropierea acesteia. Ele pot fi declanșate prin simpla stimulare superficială a pielii dintr-un anumit teritoriu specific fiecărui mușchi. Spre deosebire de celelalte reflexe medulare, reflexele cutanate par să aibă și o componentă supramedulară, deoarece dispar după secțiunea înaltă a măduvei spinării.

Reflexul cutanat abdominal constă în contracția reflexă a dreptilor abdominali, produsă de excitarea cu un ac a pielii de pe abdomen. După locul de aplicare a excitantului, se obține un reflex abdominal superior, mijlociu sau inferior.

Reflexul cremasterian se caracterizează prin contracția mușchiului respectiv, provocată de excitarea pielii în regiunea plicii inghinale.

Reflexul cutanat plantar constă în flexiunea degetelor membrului inferior din momentul excitației marginii laterale a plantei. Leziunile neuronului motor central inversează răspunsul reflex plantar. Excitarea plantei provoacă în acest caz extensia degetelor. Este semnul Babinski pozitiv, patognomonic pentru leziuni ale tractului piramidal.

20.3. REFLEXELE VEGETATIVE MEDULARE

Reflexele vegetative spinale sunt reprezentate de reflexele de micțiune, defecație, erecție și ejaculare, discutate la reglarea nervoasă a micțiunii, defecției și actului sexual. Acestea au căi aferente, centri lombo-sacrați și căi eferente specifice și diferite pentru cele două sexe, în cazul reflexelor sexuale.

Alte reacții vegetative cu sediu medular sunt reacțiile neuro-reflexe vasculare dependente de centrul vasoconstrictor, din măduva dorso-lombară, sau dilatatori, din măduva sacrată. Primii au rol important în menținerea tonusului vascular, deoarece distrugerea măduvei spinării produce vasodilatație generală, prăbușirea presiunii sanguine și fenomene de șoc spinal, iar ceilalți asigură vasodilatația din sfera genitală. Ambii centri sunt subordonați controlului bulbar și hipotalamic. La nivelul măduvei cervico-dorsale se găsesc centrul cardioacceleratori, controlați, de asemenea, de structurile nervoase bulbare și hipotalamice.

Centrul respirator medular, care funcționează numai la copiii puțin timp după naștere, coboară până la nivelul lui D₁. O serie de centri intestinoinhibitori există în măduva dorso-lombară (D₄-L₁).

Centrii sudorali și pilomotori sunt, de asemenea, larg răspândiți de-a lungul măduvei dorso-lombar, cu distribuție metamerică corespunzătoare diferitelor segmente ale corpului uman. Ca și ceilalți centri vegetativi medulari, aceștia sunt stimulați atât neuro-reflex, cât și direct, de către influențele nervoase centrale. Acestea din urmă explică reacțiile cardio-vasculare, transpirațiile profuze și piloerecția din timpul emoțiilor putermice și al stărilor de încordare neuro-psihică în general.

20.4. REFLEXELE BULBARE

Situat în partea cea mai inferioară a trunchiului cerebral, bulbul este, ca și măduva spinării, sediul unor importante reflexe somatice și vegetative. În afara funcției sale de conducere, el îndeplinește rol de centru neuro-reflex al unor reacții somato-vegetative mai complexe decât cele medulare. Împrennă cu puntea, bulbul asigură integrarea, prelucrarea și elaborarea atât a reacțiilor reflexe somatice de orientare, redresare și menținere a echilibrului, cât și a celor de autoreglare a circulației, respirației și digestiei. Majoritatea centrilor reflexi bulbo-protuberanțiali face parte din formațiunea reticulată a trunchiului cerebral. Prin intermediul acesteia și al căilor aferente specifice, este influențată și permanent adaptată la necesități excitabilitatea centrilor somatici și vegetativi din bulb și punte.

Reflexele somatice bulbare participă la menținerea echilibrului și a orientării în spațiu. Acestea dețin un rol esențial la om, a cărui poziție bipedă a redns considerabil poligonul de susținere. Membrile inferioare asigurând nu numai susținerea corpului, ci și locomoția, reflexele somatice bulbo-protuberanțiale sunt indispensabile echilibrului și poziției normale a organismului atât în repaus, cât și în stare de activitate. Dintre nucleii proprii implicați în declanșarea reacțiilor reflexe somatice de origine bulbară fac parte și nucleii olivari. Oliva bulbară, prezentând legături sinaptice cu neuronii motori din coarnele anterioare medulare, participă la producerea reflexelor tonice ale cefei și la realizarea mișcărilor reflexe oculo-cefalogire. În timp ce reflexele tonice ale cefei sunt reflexe posturale de îndreptare a capului pe corp sau invers, reflexele oculo-cefalogire sunt reflexe de orientare în spațiu a globilor oculari și a segmentului cefalic. În funcție de sursa excitațiilor aferente, reflexele de orientare sunt: labirintice, vizuale, proprioceptive și chiar exteroceptive. Formațiunile receptoare sunt excitate în aceste cazuri de trecerea din stare de repaus la mișcare sau de la o mișcare lentă la una mai rapidă (accelerare) și invers (decelerare). Dacă se aruncă o pisică în aer, atât receptorii vizuali, cât și cei labirintici sesizează deplasarea corpului și accelerarea liniară orientată în sus, determinând reacția reflexă de extensie a membrelor în vederea acroșării de orice obiect i-ar ieși în cale. Odată cu decelerarea și revenirea la sol, poziția animalului în spațiu se modifică prin reflexul de redresare și întoarcere a capului în jos și înainte, pentru a se așeza pe pământ în cele patru labe. Tonusul musculaturii trunchiului, al membrelor și globilor oculari fiind influențat de poziția capului în spațiu, intervenția receptorilor vestibulari poate fi evidențiată cu ajutorul rigidității de decerebrare. La animalul bulbo-spinal, decerebrat prin secțiune de trunchi între punte și mezencefal, tonusul mușchilor extensori apare crescut.

Rigiditatea de extensie se datorește sistemului activator vestibulo-spinal, întrucât distrugerea bilaterală a nucleului Deiters (principalul nucleu vestibular) o suprimă. În cazul secțiunii intercoliculare mezencefalice, rigiditatea de decerebrare este determinată de activarea atât a căii vestibulo-spinale, cât și a celei reticulo-spinale.

Particularitățile morfo-funcționale ale aparatului vestibular, pe de o parte, și ale formațiunii reticulate, pe de alta, au fost prezentate la capitolele respective.

Reflexele vegetative bulbare: prezența centrilor vitali cardiomotori, vasomotori și respiratori în bulb conferă acestuia capacitatea de a declanșa neuro-reflex reacțiile cardio-vasculare și ventilatorii de reglare și adaptare a circulației și respirației la nevoile variabile ale organismului. Factorii declanșatori, zonele reflexogene, căile de conducere și modalitățile de realizare a acestor reacții au fost expuse la reglarea neuro-umorală a circulației și respirației. De menționat doar că, deși inima conține toate elementele

structural-funcționale necesare contractilității ritmice, totuși, integrarea și adaptarea activității sale la diversele solicitări se realizează pe cale reflexă predominant bulbară. Reacțiile compensatoare conjuncte cardiace și vasculare, determinate de stimularea reflexă a centrilor cardio-vasomotori bulbari și modulate de formațiunile nervoase supraiacente, asigură menținerea presiunii sanguine în limite constante.

La rândul lor, centrii respiratori, formând un adevărat dispozitiv nervos bulbo-protuberanțial prevăzut cu automatism propriu, sunt sub controlul neuro-reflex al aferențelor vagale, pe de o parte, și al centrului pneumotaxic, pe de alta.

Dependente de centrii respiratori sunt reflexele de tuse și strănut. Centrul tusei este stimulat de către excitanții care vin atât de la nivelul diverselor segmente ale aparatului respirator, cât și din alte zone receptoare, cum sunt sferile: pelvină, digestivă sau cardiacă. Strănutul este, ca și tusea, un reflex expirator declanșat pe cale trigeminală de factorii iritanți din căile respiratorii superioare.

Din categoria reflexelor digestive cu localizare bulbară fac parte reflexele de deglutiție, salivare și vomă, discutate la capitolul de fiziologie a digestiei. Centrul deglutiției fiind situat în vecinătatea centrilor respiratori, stimularea sa neuro-reflexă determină oprirea pentru scurt timp a respirației și obstruarea căilor aeriene superioare.

Căile aferente și eferente ale reflexelor vegetative bulbare sunt reprezentate în majoritatea cazurilor de fibrele senzitive și motorii ale nervilor vag, glosfaringian și trigemen.

În sfârșit, sughițul este un act reflex rezultat al excitației directe a nucleului vagal bulbar.

20.5. REFLEXELE PROTUBERANȚIALE

Reflexele protuberanțiale au la bază o serie de formațiuni proprii sau omoloage cu cele din bulb și măduvă. Atât nucleii de origine ai nervilor trigemeni, oculomotor extern, facial și acustico-vestibular, cât și olivă superioară și substanța reticulată pontină constituie suportul structural al unor reflexe de alimentare, orientare și apărare mai complexe decât cele bulbare. Dintre reflexele somatice fac parte reflexele: masticator, de sucțiune, cornean de clipire, auditiv de clipire și auditivo-oculogir. În categoria reflexelor vegetative cu sediu protuberanțial, menționăm reflexele: lacrimal, salivar superior și respirator.

Reflexul de masticatie asigură actul alimentării în perioada postnatală, atât timp cât scoarța cerebrală este încă slab dezvoltată. Centrul masticator primește excitații de la nivelul receptorilor bucali pe calea fibrelor senzitive ale trigemenului, corzii timpanului și glosfaringianului. Calea aferentă este reprezentată de fibrele motorii ale trigemenului, hipoglosului și glosfaringianului. După maturarea centrilor și a căilor nervoase supraiacente, masticția este dominată de componenta voluntară corticală.

Strâns legat de actul masticției este *reflexul de sucțiune*. Acesta se deosebește de reflexul de masticție numai prin calea sa eferentă, reprezentată de fibrele motorii ale facialului.

Reflexul maseterian este un reflex miotatic simplu, declanșat de întinderea tendoanelor mușchilor masticatori în momentul coborârii mandibulei, cu participarea nucleului și fibrelor senzitivo-motorii ale trigemenului.

Reflexul salivar de origine pontină realizează stimularea neuro-reflexă a secreției glandelor submaxilare și sublinguale. Ca și în cazul reflexului salivar bulbar, stimulant al secreției parotidiene, căile aferente sunt reprezentate de fibrele senzitive ale glosfaringianului și vagului, iar impulsurile eferente ajung la cele două glande salivare pe calea nervilor: intermediar Wrisberg și coarda timpanului. Secreția glandelor salivare poate fi stimulată și pe cale reflexo-condiționată.

Reflexul lacrimal este produs de stimulii neuro-reflexi plecați de la nivelul corneei, conjunctivei și mucoasei nazale. Centrul reflex se află în nucleul lacrimal din vecinătatea nucleului facialului. Acesta primește atât aferențe trigeminale ascendente, cât și corticale descendente, explicând producerea lacrimilor nu numai de cauză iritativă reflexă, ci și de natură psiho-afectivă centrală. Calea aferentă este reprezentată de fibrele parasimpatice care ajung la glandele lacrimale pe traiectul nervilor: intermediar Wrisberg, marele pietroș superficial și al ganglionului sfeno-palatin.

Reflexul cornean de clipire este unul din reflexele de apărare ale globului ocular, inițiat de excitarea mecanică a corneei sau conjunctivei. Impulsurile nervoase ajung la centrul reflex, reprezentat de nucleul facialului, pe calea filetelor senzitive ale trigemenului. Fibrele motorii ale facialului determină contracția mușchilor pleoapelor și închiderea ochiului. Acest reflex, fiind printre ultimele care dispar în anestezie, este utilizat ca mijloc de apreciere a profunzimii narcozei. Disparația sa constituie un adevărat semnal de alarmă pentru anestezist și impune întreruperea imediată a administrării anestezicului.

Fenomenul de clipire poate fi declanșat nu numai pe cale reflexă, ci și în mod voluntar, ca urmare a aferențelor sose la nucleul facialului de la scoarță. Clipitul survine spontan, cu o frecvență de 2-10/s, în funcție de gradul de umiditate a ochiului, în vederea menținerii unui film de secreție lacrimală pe corneea și conjunctivă. El poate fi și provocat voluntar, fiind mai frecvent în stările emoționale.

Reflexul auditiv de clipire face parte din aceeași categorie a reflexelor de apărare ale globilor oculari în fața primejdiei semnalizate, de data aceasta, prin sunet. Calea aferentă este reprezentată de nervul auditiv, care conduce excitația sonoră la tuberculii acustici din punte. De la acest nivel, unda de excitație se transmite la nucleul facialului, pe ale cărui fibre motorii coboară impulsurile eferente la mușchii pleoapelor, determinând clipitul. Reflexul auditiv de clipire este utilizat în expertizele medico-legale pentru a depista simularea surdității.

Reflexul auditivo-oculogir constă în întoarcerea rapidă a globilor oculari în direcția de producere bruscă a unui zgomot. Calea sa aferentă este formată din nervul auditiv, tuberculii acustici și fasciculul longitudinal posterior, care conduc aferențele auditive la nucleii nervilor oculomotori III, IV și VI, ale căror fibre motorii constituie calea eferentă. La animalele superioare, arcul reflex auditivo-oculogir se închide mai sus, în mezencefal, întrucât secțiunea transversală practică deasupra punții suprimă reflexul respectiv.

20.6. REFLEXELE MEZENCEFALICE

Parte integrantă a trunchiului cerebral prin cele două formațiuni constituente, tectală și pedunculară, mezencefalul s-a manifestat încă de la începutul evoluției sale filogenetice ca un veritabil ansamblu funcțional efector de unde, ce face parte din așa-zisul „aparat protokinetice”.

La animalele inferioare, „centrul tectal”, ca exponent al tuberculelor cvadrigemeni, a reprezentat primul centru superior de integrare, putând fi considerat un adevărat „creier mezencefalic” anexat analizatorilor vizual și auditiv.

Apariția la vertebratele superioare a altor centri de integrare, atașați în special sistemului extrapiramidal, a dus la involuția capacității de integrare a regiunii tectale, aceasta dobândind atributele unui important centru reflex al vederii, prin tuberculii cvadrigemeni anteriori, și al auzului, prin tuberculii cvadrigemeni posteriori.

Tuberculii cvadrigemeni anteriori sunt implicați astfel în elaborarea unor acte reflexe vizuale mai simple (de acomodare) sau mai complexe (oculo-cefalogire, de convergență), atât prin aferențele provenite din cortexul occipital vizual sau căile cortico-TECTALE, via nucleul pretektal, cât și prin eferențele tecto-spinale atașate căilor extrapiramidale sau cele ale musculaturii extrinseci și intrinseci oculare; acestea sunt conectate nervului oculomotor comun (nervul III) prin nucleul Perlia, care asigură convergența globilor oculari, și prin nucleul Edinger-Westphal, implicat în reflexele de acomodare și mioză.

Tuberculii cvadrigemeni posteriori sunt implicați în diverse acte reflexe auditive, atât prin prezența aferențelor cohleare, via corpii geniculati interni, și a celor spino-TECTALE, cât și prin conectarea lor bidirecțională corticală și cerebeloasă, alături de prezența eferențelor tecto-bulbo-spinale atașate reflexelor de apărare oculo-cefalogire și de rotație bruscă a capului la zgomote foarte puternice.

Pedunculii cerebrali participă la realizarea unor importante acte simple sau complexe, prin prezența la nivelul lor a unor formațiuni neuronale reflexe grupate în structuri nucleare proprii sau omoloage (rădăcina senzitivă a nervilor V, IV și III, nucleul roșu, locus niger), pe de o parte, cât și a unor căi de conducere și asociație, pe de altă parte (fasciculele: rubro-spinal, tecto-spinal, nigro-bulbo-spinal, central al calotei și bandelela longitudinală de asociație).

Printre actele reflexe simple amintim pe cele pupilare, de acomodare la distanță sau la lumină, iar dintre cele complexe rețin atenția în mod deosebit reflexele implicate în reglarea tonusului muscular sau a comportamentului motor din stările de veghe și somn, legate de activități de postură și echilibru prin reflexe statice și statokinetice. Acestea sunt elaborate cu participarea unică a mezencefalului, cele elaborate prin cooperarea unor arcuri reflexe polisinaptice cu origine în diversele segmente ale trunchiului cerebral fiind deja consemnate în paragraful privind reflexele ponto-bulbo-medulare.

Pentru conturarea mai precisă a locului pe care îl ocupă mezencefalul în activitatea reflexă normală și în evidențierea unor sindroame neurologice cu o deosebită semnificație semiologică, datele de față se limitează la unele aspecte privind reflexele pupilare și cele oculo-cefalogire rapide, declanșate la lumină și zgomot, pe de o parte, și la reflexele statice de redresare și statokinetice cu sediul dominant mezencefalic, pe de altă parte.

Reflexele pupilare sunt destinate fie modificării diametrului pupilar la variația intensității luminoase din cadrul reflexului fotomotor iridoconstrictor sau iridodilatator, fie cu rol secundar la reflexul de acomodare însoțit de modificarea curburii cristalinului și a diametrului pupilar la variația distanței obiectului față de ochi.

La baza arcului reflex respectiv stau căile oculomotorii intrinseci (vegetative), care sunt integral reflexe, având ca elemente comune de recepție retina și ca centru reflex tuberculii cvadrigemeni anteriori.

Reflexul fotomotor are la bază variația diametrului pupilar, în sensul creșterii (midriază) sau scăderii (mioză) acestuia la reducerea și, respectiv, la creșterea intensității luminoase, prin contracția simpatcă a mușchiului iridodilatator și cea parasimpatică a mușchiului iridoconstrictor al pupilei. Acest act reflex iridomotor este declanșat atât de variația intensității luminoase prin reflexul fotomotor, cât și independent de acesta, în mod complementar, în cazul reflexului de acomodare la distanță.

Calea iridoconstrictoare, sau a *miozei*, este constituită din patru neuroni suprapuși până la un punct căii acomodative, și anume:

- un neuron retinian, similar căii reflexului de acomodare;
- un neuron tecto-nuclear, cu releu în nucleul vegetativ parasimpatic Edinger-Westphal (nervul III);
- un neuron preganglionar parasimpatic atașat la nervul III, cu releu în ganglionul oftalmic;
- un neuron postganglionar, cu origine în ganglionul oftalmic, care, pe calea nervilor ciliari scurți, inervează mușchii iridoconstrictori.

Calea iridodilatatoare, sau a *midriazei*, este constituită, de asemenea, din patru neuroni pe un traiect mult mai larg decât în cazul celorlalte arcuri reflexe:

- primul neuron pupilar se atașează aceleiași căi descrise anterior;
- neuronul tecto-spinal, ca al doilea neuron, se atașează bandetei longitudinale posterioare în asociație cu releul medular cervico-dorsal (C_8-D_2) în centrul cilio-spinal Budge (coloana intermediolateralis);
- un neuron preganglionar simpatic, cu releu în ganglionul cervical superior;
- un neuron postganglionar simpatic, cu origine în ganglionul cervical superior, care, după ce se atașează nervului carotidian al simpaticului cervical și ramurii oftalmice a trigemenului via ganglionul oftalmic, se dirijează pe calea nervilor ciliari lungi spre fibrele musculare iridodilatatoare.

Prin distribuția bilaterală a fibrelor retinene în nucleii pretectali și cei ai nervului oculomotor comun, reflexul fotomotor, ca și cel de acomodare, este consensual, astfel încât solicitarea directă a unui singur ochi antrenează indirect un răspuns consensual la ochiul nesolicitat.

Reflexul de acomodare la distanță este destinat modificării curburii cristalinului, în sensul accentuării acesteia prin intervenția mușchiului ciliar, pentru a asigura stabilitatea focarului macular al imaginii în apropierea obiectului de ochi, fiind însoțită de creșterea diametrului pupilar, independent de variația intensității luminoase.

Calea acomodării la distanță este constituită, de asemenea, din patru neuroni dispuși în ordinea următoare:

- un neuron retinian, conținut în contingentele de fibre pupilare terminate în tuberculii cvadrigemeni anteriori;
- un neuron tecto-nuclear, destinat nucleilor vegetativi (Perlia) (nervul III);
- un neuron preganglionar al parasimpaticului cranian atașat oculomotorului comun (nervul III), cu releu în ganglionul oftalmic;
- un neuron postganglionar parasimpatic atașat nervilor ciliari scurți, care inervează mușchiul ciliar.

De remarcat că acomodarea urmează totdeauna convergenței, așa încât se presupune că impulsurile proprioceptive plecate din mușchii extrinseci ai globilor oculari în cursul convergenței sunt aferente și

pentru reflexul de acomodare, pe căile motricității intrinseci descrise mai sus. Leziunile tectumului mezencefalic, în particular cele de origine sifilitică, prin aungerea electivă a centrului fotomotor, duc la dispariția reflexului pupilar la lumină, cu păstrarea celui de acomodare la distanță, simptom consemnat în patologie ca semnul Argyll-Robertson.

Reflexele oculo-cefalogire: declanșate de apariția într-o zonă a câmpului vizual a imaginii unui obiect sau a unui stimul luminos, aceste reflexe sunt însoțite de rotirea direcționată a ochilor și capului, cu urmărirea ulterioară oculo-cefalică a acestuia în cazul când obiectul este în mișcare. Deși la animalele inferioare reflexele oculo-cefalogire la lumină și zgomot se închid în punte, pe măsura evoluției filogenetice spre animale superioare și om mezencefalul îi preia locul, prin închiderea lor la nivelul tuberculelor cvadrigemeni sau chiar la nivelul scoarței occipitale.

Reprezentate de mișcări conjugate ale capului și ochilor, oculo-cefalogiria este asigurată prin activitatea sinergică a musculaturii extrinseci oculare și a celei cefalice rotatorii, având drept consecință păstrarea unui paralelism al axelor optice pentru vederea binoculară și declanșarea unor mișcări de rotație a capului pentru a dirija privirea în direcția care depășește plașa oculară doar de rotația oculară.

Mișcările de lateralitate oculară impun cooperarea sinergică a nervilor VI și III, alături de cele de convergență, pentru adaptarea la distanță a vederii; sediul acestui act reflex este în nucleul Perlia, conexiuni direct cu tuberculii cvadrigemeni anteriori.

La baza declanșării oculo-cefalogiriei reflexe, semivoluntară sau voluntară, stă calea somatică oculomotorie, cunoscută sub denumirea de calea oculo-cefalogiră, descrisă deja la funcțiile motorii ale SNC.

De consemnat că aria 19 corticală și zona extrapiramidală asigură oculogiria semivoluntară sau reflexă în trăsătură lajale cu centrul văzului, ceea ce explică atașarea acestor căi la fasciculul geniculat, apoi la calea aberantă Déjerine, pentru a se alătura în final nervului oculomotor comun și celui spinal medular.

Mișcările globilor oculari sunt astfel corelate mișcărilor capului și anumitor adaptări posturale, luând parte la realizarea diverselor stereotipuri dinamice. Asemenea activități motorii sunt asigurate printr-o reglare adaptativă continuă a tonusului muscular de natură reflexă, prin participarea unor structuri proprii sau omoloage mezencefalice, reprezentate de nucleul roșu, substanța neagră, alături de substanța reticulară, implicată, după cum se știe, în modularea sistemului gamma eferent. Legat de aceasta, nu întâmplător mezencefalul ar participa la realizarea unui mare număr de reflexe statice și statokinetice, unele dintre acestea necesitând pentru elaborarea lor implicarea și a celorlalte etaje ale trunchiului cerebral și medular.

Reflexele statice adaptează tonusul muscular fie pentru menținerea unei anumite poziții (reflexe posturale), fie în vederea revenirii la aceasta după pierderea ei (reflexe statice de redresare).

Reflexele statice posturale antrenează în elaborarea lor un număr mai mare sau mai mic de efectori, distingându-se reflexele de postură locală (reacția de magnet și de susținere), segmentare (reflexul de extensie încrucișată), intersegmentare (reacția de sprijin la stimulare zonală) și generale (reflexele tonice labirintice, reflexele tonice cervicale).

Reflexele statice de redresare participă la readucerea organismului în poziția inițială de echilibru din oricare altă poziție, îmbrăcând forma de reactivitate variată, după receptor și grupele musculare antrenate în realizarea lor. Dintre acestea fac parte reflexele labirintice, cele de redresare a corpului asupra capului sau a corpului asupra corpului, precum și reflexele de redresare optice.

Reflexele statokinetice sunt foarte rapide, intervenind prin informațiile labirintice în adaptarea dinamică a tonusului muscular pentru păstrarea unei poziții normale a trunchiului și membrilor în timpul diverselor deplasări, fie în ansamblu, fie ale unor segmente; dacă acestea sunt insuficiente sau poziția a fost pierdută, intervin reflexele posturale de redresare, care sunt cu mult mai lente. Dintre reflexele statokinetice, amintim pe cele cu participarea proprioceptorilor (proprioceptive) și pe cele cu participarea labirintului (reflexe vestibulare).

Atât reflexele statice, cât și cele statokinetice intervin în menținerea poziției normale a corpului și capului în orice circumstanță, prin ajustarea tonusului muscular și declanșarea unor mișcări corectoare adecvate.

Dai fiind variabilitatea receptorilor implicați în declanșarea unor astfel de reflexe, proprio- sau exteroceptorii, căile aferente, centrii și căile eferente ale arcurilor reflexe diferă de la un reflex la altul, având drept consecință antrenarea unor mușchi sau grupe musculare reglate ionic prin diverși centri situați în trunchiul cerebral și, mai cu seamă, la nivelul mezencefalului. Din cele elaborate cu participarea

mezencefalului, consemnăm: reflexele de redresare labirintice și cele ale corpului asupra corpului, cu centrul reflex în nucleul roșu și porțiunea adiacentă a substanței reticulate mezencefalice, reflexele de redresare a corpului asupra capului sau a capului asupra corpului, cu sediul în apropierea nucleului roșu, și reflexele de redresare a gâtului, cu sediul în porțiunea caudală a mezencefalului, precum și reflexele de redresare optice, cu sediul în substanța reticulată din apropierea nucleului roșu, cu participarea, în același timp, a cortexului vizual și a zonelor reflexogene motorii oculo-cefalogice.

În reflexele de redresare labirintică, deplasarea fluidului endolimfatic sau a otolitelor din timpul diferitelor poziții ale corpului în spațiu generează un semnal informațional gravitațional la nivelul labirintului membranos care, prin contracția reflexă a musculaturii, determină menținerea sau readucerea imediată a capului în poziția normală din spațiu. Când este posibil, prin reflexele de redresare corp-corp are loc redresarea poziției corpului în prelungirea normală a direcției capului, prin reflexe proprioceptive, cu punct de plecare de la proprioceptorii gâtului.

Reflexele de redresare a corpului asupra capului se realizează prin excitații exteroceptive asimetrice de la nivelul zonei de contact cu suprafața de susținere, având drept răspuns reacția de redresare a capului.

Reflexele de redresare corp-corp produc o redresare a corpului ca în situația precedentă, chiar în prezența capului imobilizat prin excitarea inegală a diferitelor zone corespunzătoare a două părți simetrice ale corpului.

Reflexele de redresare a gâtului sunt declanșate prin excitarea proprioceptorilor din regiunea gâtului, atunci când capul are poziție anormală față de trunchi și invers, ceea ce duce la reajustarea și alinierea uoară din segmente în raport cu celelate.

Reflexele de redresare optice permit controlul cu ajutorul cortexului vizual-occipital și centrilor mezencefalici oculo-cefalogici a poziției normale a corpului în spațiu, în vederea readucerii la poziția normală numai în cazul menținerii ochilor deschiși.

Reflexele labirinto-kinetice, declanșate prin excitarea receptorilor din canalele semicirculare sau vestibul, sunt sub dependență atât a nucleului roșu mezencefalic, prin fasciculele sale rubro-spinale, cât și sub dependență a căilor eferente motorii, distribuite mușchilor gâtului, membrilor și șanțurilor vertebrale.

Dintre acestea, rețin atenția reflexele care intervin pentru menținerea echilibrului în timpul deplasărilor într-un vehicul care circulă cu o accelerație ughiulară sau liniară (reacția liftului), prin accelerarea sau frânarea bruscă ori luarea curbilor în loc. Tot în cadrul acestor reflexe sunt incluse și cele declanșate prin învârtirea rapidă a corpului (poziția de discobol) sau în cazul eliminării bruste a punctelor de sprijin al membrilor inferioare (reacția de pregătire pentru săritură). De menționat că reacția de pregătire la săritură se asociază reflexelor statokinetice, întrucât reprezintă o formă particulară a reflexelor labirintice de progresie, care pun membrele într-o poziție ce declanșează reacția de sprijin de îndată ce ele ating solul.

Rolul axului cerebro-spinal și, în special, al mezencefalului în activitatea reflexă toogenă este, după cum se știe, mai pregnant evidențiată prin practicarea experimentală a unor secțiuni de-a lungul axului cerebro-spinal, din care cea transrubrică (intercolicuară Sherrington) este însoțită de o așa-zisă „rigiditate de decerebrare” reprezentată de flexiunea statokinetică cu persistența doar a reflexelor de redresare a gâtului. Uo astfel de sindrom s-ar datora unei hipertonii marcate a mușchilor extensori antigravitaționali, drept cosecință a unei hiperactivități alfa-gamma, în care formațiunea reticulată activatoare, nucleul roșu și, în special, substanța neagră a mezencefalului ar fi cu precădere implicate (vezi funcțiile senzoriale și motorii ale SNC, fiziologia posturii și locomotiei umane).

20.7. ACTIVITATEA BIOELECTRICĂ A SCOARTEI CEREBRALE

Neuronii corticali, la fel ca orice celulă nervoasă, prezintă o serie de proprietăți bioelectrice, ca rezultat al distribuției particulare a sarcinilor ionice de o parte și de alta a membranei, atât în repaus, cât și în cursul activității sale.

Țesutul cerebral uman conține aproximativ 3×10^9 neuroni, la care se adaugă un număr de peste 10 ori mai mare de celule gliale. Din combinarea activității acestor elemente rezultă variațiile (continue și

ritmice) de potențial electric, care au loc la nivelul creierului uman în tot cursul vieții, atât în stare de veghe, cât și în timpul somnului.

Modificări tranzitorii deosebite ale activității bioelectrice pot fi obținute în regiuni restrânse ale țesutului cerebral prin stimularea diverselor sisteme senzoriale, obținându-se astfel potențiale evocate caracteristice. Detalii deosebite pot fi obținute prin utilizarea unor microelectrozi, care pot fi inserați în imediata vecinătate sau chiar în interiorul unui neuron, prin intermediul căruia se pot urmări variațiile activității bioelectrice unitare în diferite condiții experimentale.

Înregistrarea extracelulară a potențialului unitar dă indicații numai asupra variațiilor excitatoare ale potențialului de membrană, iar urmărirea intracelulară aduce informații și în legătură cu influențele inhibitoare și cu modificările produse de excitanți cu intensitate subliminară.

20.7.1. TRASEUL EEG NORMAL

Înregistrarea activității bioelectrice deviate la suprafața creierului sau la suprafața craniului arată o activitate electrică continuă. Traseul și intensitatea acestei activități bioelectrice sunt determinate în mare măsură de nivelul general de excitare a creierului, ca urmare a activității sistemului reticulat activator. Ondulațiile de potențial bioelectric înregistrate sunt numite undele creierului, iar traseul poartă numele de electroencefalogramă. Existența variațiilor de potențial cerebrale, semnalată cu peste 100 de ani în urmă, a fost utilizată pentru prima dată în clinica umană de Hans Berger (1929) ca indicator de sănătate sau boală.

Înregistrarea activității electrice a creierului se realizează cu ajutorul unor electrozi de culegere bipolari sau unipolari, plasați pe scalp ori direct pe scoarță și conectați la un sistem standardizat de amplificare. Filtrare și prezentare grafică a diferențelor de potențial existente între sau sub electrozii respectivi.

Devenită, ca și electrocardiograma, unul din examenele de rutină, electroencefalograma oferă o serie de informații utile asupra manifestărilor electrice cerebrale normale sau patologice, generate de fenomenele electro-chimice de sincronizare și desincronizare postsinaptică a neuronilor corticali. Amplitudinea și frecvența acestora diferă substanțial atât în condiții normale de veghe (veghe-somn), cât și în diferite stări patologice.

Amplitudinea undelor creierului înregistrate la suprafața scalpului nu depășește 300 de microvolți, iar frecvența se întinde de la o undă la câteva secunde, până la unde cu frecvență de peste 50 c/s. Caracteristicile undelor depind, în mare măsură, de gradul de activitate a cortexului cerebral, ele schimbându-se foarte mult între starea de veghe și somn.

În cea mai mare parte a timpului, undele creierului au aspect neregulat, neexistând o schemă general decelabilă în EEG. Uneori însă, apar aspecte distincte caracteristice, așa cum se întâmplă în cazul epilepsiei și chiar la subiecți normali, care pot fi clasificate în unde alfa (b), beta (a), teta (c), delta (e) (fig. 20.6).

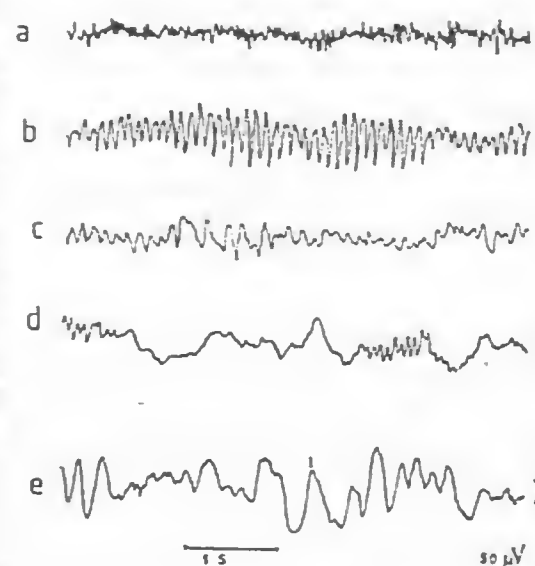


Fig. 20.6. Tipuri diferite de unde EEG. a: atenție. b: repaus. c: somnolență. d: somn instalat. e: somn profund.

Undele alfa sunt unde ritmice, care au o frecvență de 8-12 c/s, amplitudine între 30-100 de microvolți și se întâlnesc pe traseele EEG aproape ale tuturor subiecților normali în stare de veghe și repaus. Acest tip de unde se înregistrează mai ales în regiunea occipitală, dar și în zonele parietale și frontale ale craniului. Ele dispar de pe traseul subiecților în stare de somn sau când atenția este îndreptată spre un aspect specific de activitate mentală. În aceste circumstanțe, undele alfa sunt înlocuite cu unde asincrone, de amplitudine mai redusă, dar cu frecvență ridicată. Se presupune că undele alfa reprezintă manifestarea activității spontane a sistemului talamo-cortical difuz, care realizează periodicitatea lor și activarea sincronă a milioane de neuroni corticali în timpul fiecărei unde. Ritmul alfa apare numai în condițiile în care scoarța cerebrală este conectată cu talamusul. De altfel, stimularea nucleilor talamici cu proiecție difuză determină apariția, în sistemul talamo-cortical difuz, a unor unde cu frecvență de 8-13 c/s identice undelor alfa electroencefalografice.

Închiderea ochilor determină sincronizarea undelor α reprezentată de creșterea amplitudinii dublată de scăderea frecvenței undelor electrice corticale.

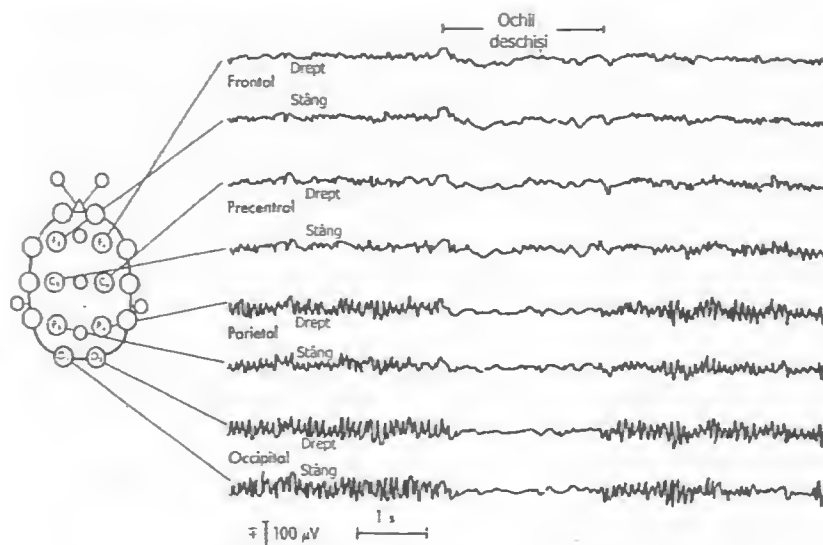


Fig. 20.7. Electroencefalograma normală, cu blocarea undelor alfa la deschiderea ochilor.

Reacții electrocorticale inverse, de inhibare a amplitudinii, apar la deschiderea ochilor (fig. 20.7).

Undele beta sunt generate cu o frecvență de 14-25 c/s, dar uneori pot să atingă frecvențe de 50 c/s, sau chiar superioare, și cu amplitudine mică, de 5-50 microvolți. Se înregistrează în regiunile parietale și frontale ale scalpului și sunt subdivizate în unde beta I și II. Undele beta I au o frecvență aproape dublă față de ritmul alfa și sunt afectate în aceeași manieră de activitatea mentală ca și undele alfa. Dimpotrivă, undele beta II apar ca urmare a unei intense solicitări a SNC sau în timpul perioadelor de tensiune. Deci, în timp ce undele de tip beta I sunt inhibitate de activitatea cerebrală, cele de tip beta II sunt rezultatul acesteia.

Undele teta au frecvența de 4-7 c/s, se înregistrează în regiunile parietale și temporale la copil, dar pot fi observate și la adulți în stare de stres sau în condițiile unei decepții, ori ale unei stări de frustrare. Astfel de unde se înregistrează la subiecți prezentând numeroase tulburări cerebrale.

Undele delta reprezintă orice deflexiune electroencefalografică cu o frecvență sub 3 c/s și, mai ales, unde a căror frecvență este de un ciclu la 2-3 secunde. Astfel de unde se întâlnesc în timpul primei copilării în stările de somn profund sau în tulburări organice grave. Experimental, undele delta se înregistrează la animale al căror cortex este separat prin secțiune de talamus, deci la care se blochează sistemul reticular ascendent. Faptul că astfel de unde apar în cursul somnului profund lasă loc interpretării că ele sunt rezultatul eliberării cortexului de influențele activatoare ale sistemului reticular ascendent cu proiecție difuză. Deci, undele delta indică posibilitatea existenței unui mecanism de sincronizare a activității neuronilor corticali din însăși structurile scoarței cerebrale.

20.7.2. UTILIZAREA ELECTROENCEFALOGRAAMEI ÎN CLINICA UMANĂ

În practica medicală, EEG are trei principale utilizări:

1. ca metodă de diagnostic a disfuncțiilor cerebrale (epilepsie de tip *grand mal* și *petit mal*, boli neurodegenerative, alterări tumorale, boli neuropsihice, migrenă etc.);
2. ca modalitate tehnică de precizare a stării de conștiință, veghe și somn;
3. ca modalitate de stabilire legală a morții clinice cerebrale.

Cea mai largă utilizare clinică a electroencefalogrammei o constituie diagnosticul diferitelor tipuri de epilepsie; înregistrările EEG permit și localizarea tumorilor cerebrale sau a altor leziuni ale creierului și contribuie, de asemenea, la precizarea diagnosticului în anumite afecțiuni psihice.

Modificările patologice care apar pe traseul electroencefalografic pot fi interpretate ca urmare a variațiilor de frecvență, amplitudine, morfologie și pot îmbrăca o evoluție paroxistică sau neparoxistică (a se vedea traseele EEG la subcapitolul somn-veghe).

La rândul lor, anomaliile neparoxistice pot interesa întregul traseu sau pot fi localizate și se traduc fie printr-un exces al activității rapide, fie al celei lente. De altfel, în timpul stărilor de atenție și emoție crescută se înregistrează în mod normal trasee desincronizate, cu unde rapide și de voltaj scăzut. În condiții patologice, apar trasee în care predomină ritmul rapid, cu unde relativ ample și regulate, cum sunt cele din unele intoxicații cu barbiturice și benzodiazepine.

Trasee cu unde lente se întâlnesc în mod obișnuit la copil și în timpul somnului la adult, iar, în mod patologic, traduc suferințe difuze ale sistemului nervos, de tipul encefalopatiilor și encefalitelor, hipertensiunii intracraniene, stărilor comatoase sau leziunilor mezencefalice cu dezaferentare corticală.

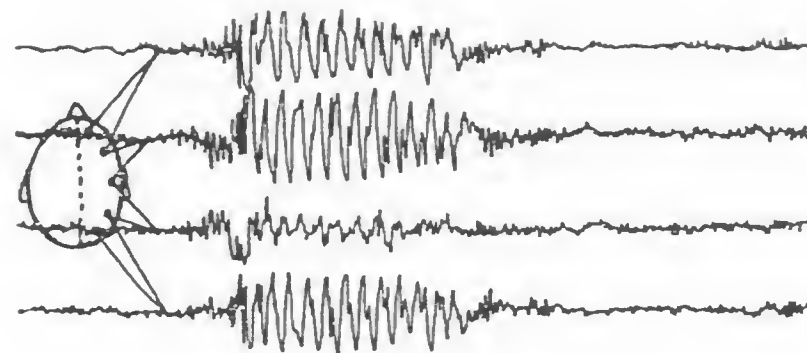


Fig. 20.8. Complex vârf-unde epileptice.

Modificările neparoxistice localizate pot să apară în faza precoce a anoxiilor corticale în primele ore după accidente vasculare cerebrale sau traumatisme cranio-cerebrale.

Activitatea lentă focalizată traduce de fiecare dată un proces lezional și este necesar să se urmărească prin examinări succesive; ea poate avea un caracter regresiv, cum se întâmplă de cele mai multe ori în cazul accidentelor vasculare, sau progresiv, ca în cazul tumorilor cerebrale.

Anomaliile paroxistice sau iritative se traduc prin apariția și dispariția bruscă a unor grafoelemente de amplitudine mare, care se detașează net de activitatea de fond și pot îmbrăca următoarele aspecte morfologice:

a) *vârful* este o deflexiune de scurtă durată (mai mică de 0,10 s) și care poate să apară izolat sau grupat (polivârful);

b) *unda ascuțită*, sau *vârful lent*, are amplitudine mare și durată între 0,10–0,20 s. Sunt descrise două tipuri de unde ascuțite: unele au ambele versante abrupte – „unda ascuțită propriu-zisă”, iar altele prezintă numai versanții ascendenți abrupti – „unda lentă, cu panta abruptă”;

c) *unda lentă* este un element cu durată mare, de peste 0,15 s, și apare în banda de frecvență beta sau delta; d) *complexul vârf-undă* cuprinde o secvență alcătuită dintr-un vârf urmat de o undă lentă. Astfel de complexe pot să apară în mod constant, repetându-se cu o frecvență de 3 c/s, așa cum se întâmplă în formele tipice de „petit mal”. Uneori, elementele componente ale complexului vârf-undă au o morfologie sau durată diferită de cea tipică și sunt etichetate „complex-undă variant” (fig. 20.8).

e) *complexul polivârf-undă* apare în epilepsia mioclonică și este alcătuit din mai multe vârfuri urmate de o undă lentă.

Toate aspectele EEG discutate în cadrul anomaliilor paroxistice traduc pe plan fiziopatologic o sincronizare patologică a unui număr mare de neuroni, care descarcă în același timp, în aceeași fază și același sens electric, realizând o sumare a activităților. Activitatea paroxistică acompaniază criza de epilepsie, dar poate fi evidențiată și în intercrize.

20.7.3. POTENȚIALE EVOCATE LA NIVELUL SCOARȚEI CEREBRALE

Potențialele evocate la nivelul scoarței cerebrale după stimularea unui anumit câmp receptor se pot înregistra prin aplicarea unor electrozi pe suprafața ariei de proiecție corticală sau a scalpului din dreptul zonei respective.

De utilitate reală au devenit electrocorticografia, realizată intraoperator, și stereoelectroencefalografia, cu posibilități extinse la nivelul diverselor structuri subcorticeale. De asemenea, posibilitățile de studiu și tratament ale diverselor structuri cortico-subcorticeale s-au îmbunătățit odată cu introducerea tehnicilor moderne RMN, tomografie computerizată cu contrast și PET (tomografie cu emisie de pozitroni).

Forma, amplitudinea și valoarea perioadei de latență variază de la o modalitate de activitate la alta și în funcție de poziția electrodului de înregistrare față de generatorul potențialului evocat.

Forma potențialului evocat la nivelul cortexului primar este în majoritatea cazurilor bifazică (pozitiv-negativă), iar amplitudinea maximă nu depășește câțiva milivolți.

Componenta pozitivă a potențialului evocat indică activitatea somei, iar cea negativă răspândirea acesteia la nivelul dendritelor apicale.

Faza pozitivă a potențialului evocat primar ar reprezenta activitatea corticopetă, în timp ce faza negativă ar traduce activitățile intracorticală și corticofugă.

La baza tuturor potențialelor evocate cortical stă o formă de activitate sincronă a neuronilor de formă piramidală, cu prelungiri dendritice lungi și orientate vertical.

Sistemele neuronale corticale excitatoare și inhibitoare constituite din neuroni intercalari și din sistemul dendritic reglează excitabilitatea neuronală, iar dezechilibrarea acestora ar putea duce la apariția unei activități convulsive.

Înregistrarea unităților activate a scos în evidență că descărcări neuronale apar pe parcursul desfășurării ambelor faze ale răspunsului evocat primar, cu un maximum în timpul trecerii fazei pozitive în faza negativă.

Configurația răspunsului evocat primar se modifică profund dacă electrodul de culegere se deplasează dinspre suprafața cortexului spre straturile cele mai profunde, devenind, din pozitiv, negativ, așa cum se

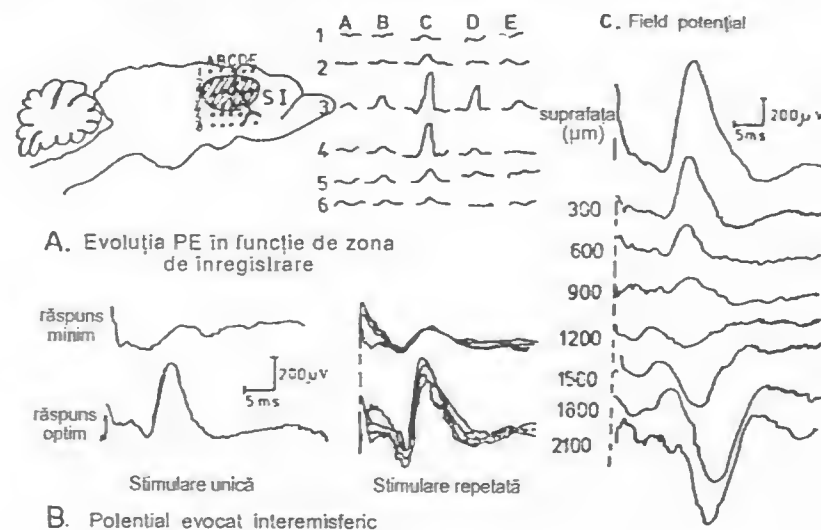


Fig. 20.9. Potențiale evocate cortical în funcție de zonă, profunzime și tipul de stimulare (unică sau repetată).

înregistrează la suprafața scoarței cerebrale, în timp ce în profunzime devine, din negativ, pozitiv. Nivelul de inversare diferă de la o modalitate la alta de activare, dar el reflectă situarea generatorului în grosimea cortexului.

Stimularea periferică generează un potențial evocat la nivelul scoarței cerebrale, a cărui amplitudine este maximă într-o regiune corticală limitată. Îndepărtarea electrodului de înregistrare din regiunea respectivă se însoțește de modificarea amplitudinii forme și perioadei de latență a potențialului derivat (fig. 20.9). Bazându-se pe această particularitate s-au realizat diferitele hărți topografice ale suprafeței corpului sau ale diverselor organe receptoare la nivelul cortexului cerebral. Generarea potențialului evocat primar în ariile specifice se însoțește de apariția unui răspuns similar în ariile de asociație.

20.8. SOMNUL ȘI VEGHEA

Somnul este actul comportamental ciclic (reversibil) determinat de nevoia imperioasă de repaus și odihnă, realizat de suprimarea parțială a sensibilității și funcțiilor conștiente de relație, relaxare musculară și activitate onirică. Având caracter instinctiv și periodicitate circadiană, satisfacerea nevoii de somn este la fel de importantă ca și a celorlalte necesități fiziologice fundamentale (foame, sete etc.).

Ca manifestare periodică de repaus realizată prin suprimarea temporară a diverselor forme de activitate conștientă, somnul este un fenomen ritmic legat de alternanța zi-noapte ce ocupă aproximativ 1/3 din viața omului adult. Durata somnului în decursul a 24 de ore este diferită în funcție de vârstă. Astfel, la nou-născut, somnul ocupă 22 de ore, la 3 luni 18 ore, la 6 luni 16 ore și descrește apoi după o curbă liniară, pentru ca, la vârsta de 20 de ani, să cuprindă 8 ore din nictemer și să se mențină la această valoare în tot cursul vieții. Durata de somn variază de la o persoană la alta, de la 6 la 9 ore și se desfășoară după vârsta de 1 an aproape exclusiv noaptea (fig. 20.10).

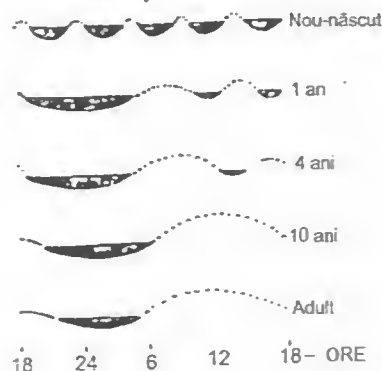


Fig. 20.10. Evoluția alternanței stărilor de veghe și somn la om, în cursul dezvoltării ontogenetice.

Suprimând funcțiile de relație cu mediul înconjurător și lăsând în stare de activitate pe cele organo-vegetative de întreținere a proceselor vitale, somnul fiziologic asigură refacerea potențialului energetic și funcțional al organismului în vederea îndepărtării fenomenelor de oboseală acumulate în timpul activității diurne și a reluării activității normale după trezire. Revenirea imediată din această stare este criteriul fundamental al diferențierii somnului fiziologic de alte stări de pierdere a activității conștiente și reactivității critice (sincope, come, hipnoza, narcoza, absența epileptică etc.).

Spre deosebire de starea de veghe, care se realizează și se menține prin fenomene neurofiziologice active, cu participarea sistemului reticulat activator ascendent, a unor structuri mezencefalo-diencefalice și a scoarței cerebrale, somnul fiziologic are la bază o componentă pasivă și alta activă. Componenta pasivă a somnului a fost pusă pe seama întreruperii stării de veghe de către fenomenele de oboseală nervoasă progresivă determinate de către substanțele „faiigante” rezultate din activitatea excesivă polineuronală. La rândul său, componenta activă are la bază participarea unor structuri nervoase din trunchiul cerebral (nucleii rafeului pontin, locus coeruleus) și diencefal, influențate de variațiile mediației chimice plurifactoriale centrale. S-a precizat astfel că somnul fiziologic nu reprezintă numai întreruperea pasivă a stării de veghe, ci se realizează prin fenomene predominanți active de refacere a potențialului metabolic și energetic cerebral, stimulate de către substanțele neurotransmițătoare și modulatori centrale.

20.8.1. MANIFESTĂRI CARACTERISTICE SOMNULUI FIZIOLOGIC

Printre semnele caracteristice stării de somn figurează în primul rând suprimarea funcțiilor conștiente de relație, absența mișcărilor spontane și scăderea tonusului muscular.

Activitatea motorie studiată actografic sau electromiografic pune în evidență o reducere progresivă a tonusului muscular de repaus, până la dispariția completă a acestuia în somnul paradoxal profund. Activitatea reflexă este exagerată în perioada de adormire și deprimată în timpul somnului propriu-zis. Reflexele de apărare (flexiune) persistă mult timp la subiecții adormiți. O inversare a reflexului plantar (Babinski) apare în perioadele de somn profund, ca urmare a scăderii sau suprimării controlului cortical al anumitor mișcări automate.

Manifestările organo-vegetative fiind mai puțin evidente în timpul somnului, sunt evidențiate în multe cazuri cu oarecare dificultate. În general, somnul normal se însoțește de scăderea tonusului simpatic și creșterea celui parasimpatic. În timp ce activitatea aparatului cardio-vascular are tendință la scădere, circulația sângelui prezintă o oarecare creștere în unele zone superficiale însoțită de modificarea repartiiției acestuia în teritoriul visceral. Frecvența și amplitudinea mișcărilor respiratorii scade, de asemenea, în cursul somnului, determinând creșterea presiunii parțiale a CO_2 din aerul alveolar. La subiecții cu tulburări ventilatorii produse de alterările căilor respiratorii superioare sau de origine nervoasă centrală apar

fenomene tranzitorii obstructive sub formă de apnee sau hipopnee, cu frecvențe și durate variabile, producătoare de deteriorarea calității somnului nocturn însoțită de somnolență diurnă excesivă, cunoscute sub denumirea de sindrom al apneelor obstructive din somn (SAOS). Secreția sucului gastric scade în timpul somnului, pentru ca, la trezire, aceasta să crească, în timp ce secreția sudorală prezintă creșteri determinate de fenomenele de termoliză nocturnă.

Informații valoroase asupra stării de veghe și somn oferă înregistrările poligrafice simultane ale manifestărilor electrice de la nivelul scoarței cerebrale (EEG), musculaturii scheletice (EMG), globilor oculari (EOG) și unor structuri subcorticele (formațiune reticulată, hipotalamus, hipocamp etc.).

Înregistrările electroencefalografice (EEG) inițiate în urmă cu peste 70 de ani (Berger, 1929) au adus o serie de date utile referitoare la durata, profunzimea și sistematizarea diferitelor faze ale somnului uman normal sau patologic.

EEG înregistrează diferențele de potențial electric dintre electrozii plasați pe scalp sau scoarță ale neuronilor corticali sincronizați de către structurile subcorticele reticulo-talamice activatoare.

Intensitatea undelor electrice cerebrale variind la nivelul diverselor zone ale scalpului de la 0 la 200 microvolți, iar frecvența lor oscilând de la una la fiecare câteva secunde până la 50 pe secundă, în funcție de amplitudine și frecvență, EEG normală prezintă 4 tipuri de unde: alfa, beta, theta și delta. Frecvența și intensitatea undelor respective este menționată în tabelul 20.1:

TABELUL 20.1

Frecvența undelor EEG	
Unde EEG	Frecvența undelor
Alfa	8 - 12 cps (Hz)
Beta	13 - 30 cps (Hz)
Delta	0,5 - 3,5 cps (Hz)
Theta	4 - 7,5 cps (Hz)

La subiectul relaxat cu ochii închiși predomină undele alfa, sincronizate, mai evidente în ariile parieto-occipitale (fig. 20.11).

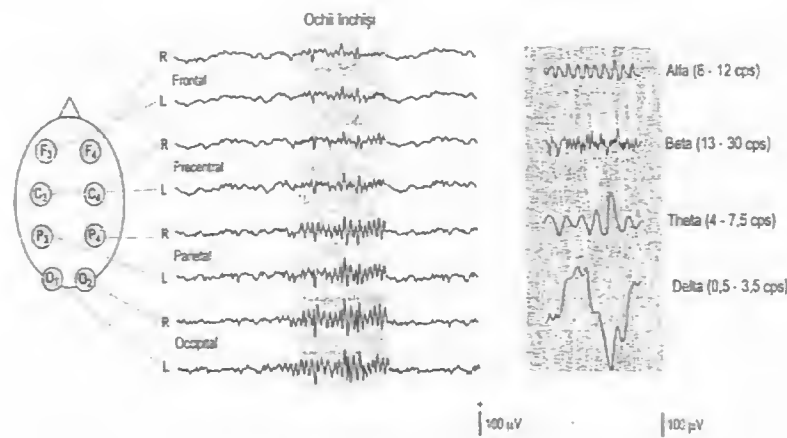


Fig. 20.11. Înregistrarea diverselor tipuri de unde EEG corticale, înainte și după închiderea ochilor.

Activitatea mentală sau stimularea senzorială, ca deschiderea ochilor, determină blocarea undelor alfa. În locul acestora apar undele beta, de mică amplitudine, cu frecvență mai mare (20 cps), realizând un traseu EEG desincronizat cu unde de amplitudine și frecvență variabile în funcție de zona explorată. Dacă subiectul devine somnolent și intră în fază de adormire, apare ritmul alternant, cu unde lente de tip theta (3–7 cps) dispuse sub formă de „fusuri”, pentru ca odată cu instalarea somnului profund să predominie undele delta ample și lente (0.5–2 cps). La aproximativ fiecare 60–90 de minute, somnul cu unde lente se transformă în somn paradoxal REM de voltaj redus și cu descărcări electrice rapide (13–30 cps), ce durează 10–20 de minute. Trezirea spontană poate fi considerată ca o etapă inversă fenomenului de adormire. La rândul lor, înregistrările EMG și EOG realizate simultan cu EEG întregesc tabloul fazelor electro-fiziologice ale somnului.

Raportate la starea de veghe a unui subiect treaz, la care predomină undele alfa (8–12 cps), înregistrările poligrafice rezultate evidențiază apariția undelor EEG lente, dispuse mai întâi sub formă de „fusuri”, urmate de undele theta și delta ample și lente în cazul somnului profund (non-REM), transformate în unde rapide și de mic voltaj caracteristice somnului paradoxal REM. În timp ce instalarea somnului cu unde lente se face progresiv trecându-se prin diferite faze, somnul paradoxal survine brusc în 2–3 secunde.

La rândul său, hipotonia musculară se realizează prin inhibiția reflexelor mono- și polisinaptice medulare indusă de locus coeruleus, în timp ce mișcările rapide ale globilor oculari din timpul somnului paradoxal sunt dependente de nucleii vestibulari subordonați centrilor mezencefalici.

Manifestări electrice importante se produc concomitent la nivel subcortical, mai ales în trunchiul cerebral, hipotalamus și hipocamp, indicând participarea predominantă a formațiunii reticulate activatoare la realizarea stării de veghe și a componentei bulbo-pontine la producerea și evoluția stării hipnice.

20.8.2. STADIILE SOMNULUI NORMAL

Trecerea de la starea de veghe la somnul propriu-zis este adeseori dificil de precizat. În prima fază de adormire (așipire), activitatea voluntară diminuează, percepțiile vizuale și auditive își pierd semnificația, mecanismele asociative persistă, dar fără participare intelectuală. În această perioadă de somnolență pot apărea imagini hipnagoge, mioclonii, mișcări sacadate ale globilor oculari, căderea pleoapelor etc.

La rândul lor, înregistrările EEG au evidențiat două faze ale somnului fiziologic, având o succesiune ciclică de 4–6 episoade pe durata unei nopți. Cele două faze sunt reprezentate de somnul cu unde lente și somnul paradoxal cu unde rapide. În timp ce somnul cu unde lente, denumit și sincronizat, se instalează lent și cuprinde trei stadii de profunzime crescândă, caracterizate de înlocuirea undelor de somnolență – alfa cerebrale (8–12 cps), cu unde lente și ample de tip theta (3–7 cps) și delta (0.5–3 cps), somnul paradoxal survine brusc, având pragul de trezire comportamentală mult mai ridicat decât al somnului lent.

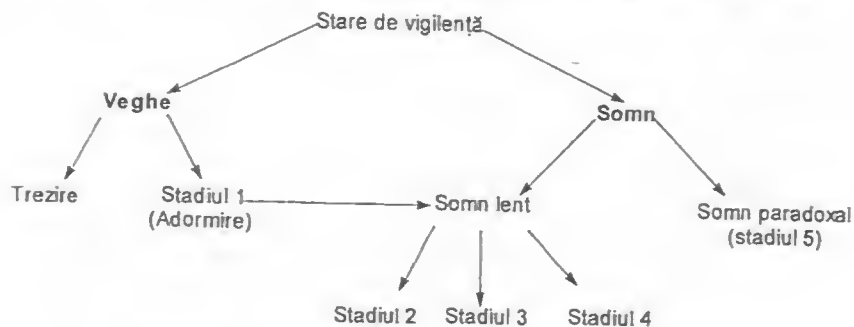


Fig. 20.12. Stadiile stărilor de vigilență la om.

În cazul somnului paradoxal sau REM (*rapid eye movements*), denumit și stadiul V de somn, predomină undele beta rapide și de voltaj redus, similare cu cele din starea de veghe (13–30 cps). De aici și denumirea de „somn paradoxal” sau destabilizat. Caracteristic acestuia este aspectul în „dinți de fierăstrău” al EEG, abolirea tonusului muscular și apariția viselor și mișcărilor oculare rapide.

După Gaillard (1990), stările de vigilență reprezentate de alternanța veghe-somn se prezintă ca în fig. 20.12.

Identificarea stadiilor somnului se realizează pe baza înregistrării frecvenței și amplitudinii undelor EEG, întregite de modificările EMG și EOG.

Stadiul 1, de adormire, cu durată normală de câteva minute, se caracterizează printr-un traseu EEG mixt, dominat de unde theta cu frecvență de 3–7 cps. În această perioadă, se produc mișcări oculare lente, iar respirația prezintă uneori pauze cu durate mai mici de 10 secunde fără semnificație patologică.

Stadiul 2, de somn lent, se instalează după câteva minute de la adormire și este marcat de undele dispuse sub formă de „fusuri” și rare complexe K (complexe kappa de unde cu amplitudine mare). Odată cu aprofundarea somnului, undele lente devin tot mai ample, făcând trecerea din stadiul 2 către somnul profund cu unde lente ale stadiilor 3 și 4 generate de undele theta și delta, cu amplitudine crescândă și frecvență joasă (fig. 20.13).

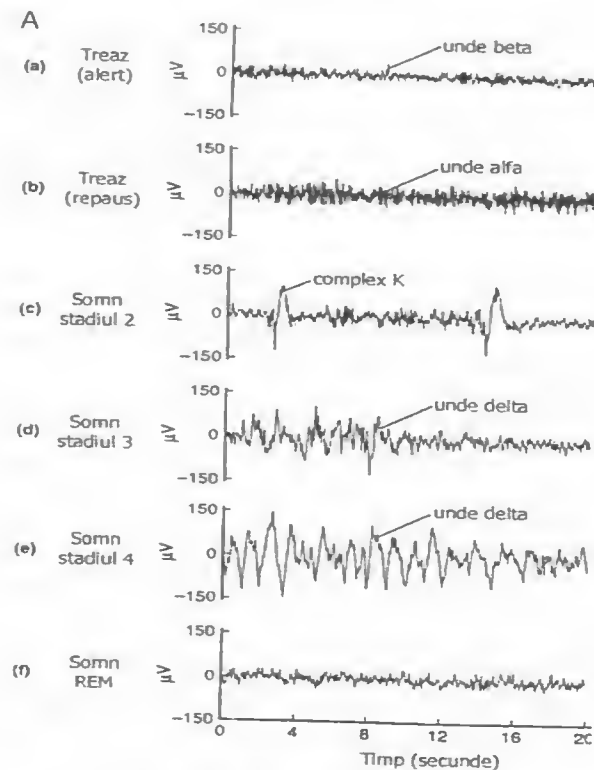


Fig. 20.13. Înregistrări EEG în timpul veghe și somnului.

Simpla închidere sau deschidere a ochilor determină creșterea amplitudinii undelor EEG în cazul închiderii pleoapelor și scăderea acesteia la deschiderea ochilor.

Somnul paradoxal REM este diferit de fazele somnului lent non-REM prin faptul că activitatea electrică corticală este constituită rapid și majoritar din unde beta de mică amplitudine (în „dinți de fierăstrău”), similare cu cele din starea de veghe. O altă componentă importantă a somnului paradoxal este reprezentată de mișcările rapide ale globilor oculari însoțite de producerea viselor.

Între stadiile 1 și 5 se produce o scădere progresivă a tonusului muscular însoțită de reducerea frecvenței cardiace și respiratorii. În cele 7-8 ore de somn nocturn ale adultului normal se înregistrează 4-6 episoade de somn paradoxal REM. la intervale de 60-90 de minute și cu durate de 10-15 minute, reprezentând doar 20-25% față de 70-75% somn cu unde lente. Metabolismul bazal scade cu 10-20% în timpul somnului.

La copii predomină somnul paradoxal REM (peste 50%), în timp ce la vârstnici acesta este slab reprezentat. Înregistrarea electrică continuă a somnului nocturn este în prezent analizată computerizat din punct de vedere al structurii stadiale și redată sub formă de diagramă denumită hipnogramă (fig. 20.14).

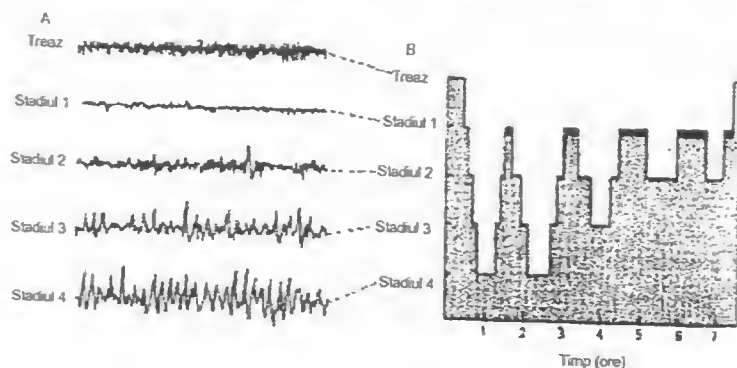


Fig. 20.14 Electroencefalograma (A) și hipnograma (B) stadiilor somnului fiziologic.

Aceasta evidențiază faptul că somnul lent profund (stadiile 3 și 4) atinge gradul cel mai ridicat de profunzime în primele ore, pentru ca apoi să descrească succesiv.

De remarcat predominanța somnului lent profund la începutul nopții și cea a somnului paradoxal REM spre sfârșitul perioadei de somn nocturn. De reținut, de asemenea, durata mai mare a somnului paradoxal REM reprezentat de banda neagră a fiecăruia din cele 5 cicluri (somn lent – somn paradoxal REM) ale somnului normal.

Pe plan funcțional, starea de veghe prelungită se însoțește de perturbări progresive ale proceselor de atenție și reacțiilor comportamentale ale subiectului, în timp ce somnul restabilește echilibrul funcțiilor normale ale sistemului nervos.

Privățiunea de somn determină fenomenul de „rebound” (creșterea perioadei de somn în cursul uicemerului următor). Dacă somnul lent este legat de procese metabolice și funcționale restaurative de tip anabolic, somnul paradoxal REM, fiind constituit din unde theta de mică amplitudine similare cu ale stării de veghe, pare a fi necesar pentru asimilarea unor informații asociate cu încărcătură afectivă generatoare de vise și diferite alte manifestări somato-vegetative inconștiente.

La rândul său, somnul indus de droguri se realizează prin procese neurochimice diferite, în funcție de structura drogului respectiv și particularitățile receptorilor specifici neurotransmițătorilor și modulatorilor chimici cerebrali. În timp ce tiobarbituricele induc o activitate electrică predominant fronto-parietală de tip beta prin mecanism GABAergic, efectul narcotic al tiopenonei determină mai întâi un voltaj redus și rapid, urmat de predominanța undelor ample și lente (theta și delta) generalizate. La rândul lor, benzodiazepinele hipnotice facilitează transmiterea sinaptică GABAergică la nivelul scoarței cerebrale, facilitând deschiderea canalelor hiperpolarizante de clor.

Un loc aparte dețin înregistrările EEG în cadrul explorărilor neurofiziologice curente atât ca modalitate de testare a capacității funcționale a SNC, cât și în scopul stabilirii diagnosticului unor stări patologice (epilepsie, boli neuro-psihice, comă, moarte cerebrală etc.).

20.8.3. STRUCTURI ȘI MECANISME DE PRODUCERE A VEGHII ȘI SOMNULUI

Clasic, se admite că la realizarea ciclului veghe-somn participă trei sisteme neurale centrale:

- un sistem de trezire aparținând sistemului reticulat activator ascendent;
- un centru al somnului cu unde lente de la nivelul nucleilor bulbari ai rafeului;
- un centru al somnului paradoxal cu sediul în nucleul pontin locus coeruleus.

La baza acestui concept clasic stau rezultatele cercetărilor experimentale pe animale deaferentate la diferite nivele ale trunchiului și emisferelor cerebrale. Spre deosebire de sistemul reticulat activator, care generează descărcări electrice rapide de voltaj redus în timpul stării de veghe, centrul somnului cu unde lente are sediul bulbo-pontin. La rândul său, centrul somnului paradoxal are sediul în nucleul locus coeruleus de la nivelul joncțiunii ponto-mezencefalice.

După unii autori (Jouvet, 1972), nucleii rafeului pontin ar participa la declanșarea somnului lent, în timp ce locus coeruleus ar fi responsabil de inhibiția tonusului muscular din timpul somnului paradoxal. Teoria deaferentării somnului, la diferite nivele cortico-subcortico-bulbare a evidențiat la pisică o alternanță ritmică a somnului sincronizat (cu unde EEG lente) cu a celui paradoxal desincronizat caracteristic trezirii, însoțită de constricția și, respectiv, dilatarea pupilelor, în cazul separării creierului de măduva spinării (*encephale isolé*) (fig. 20.15).

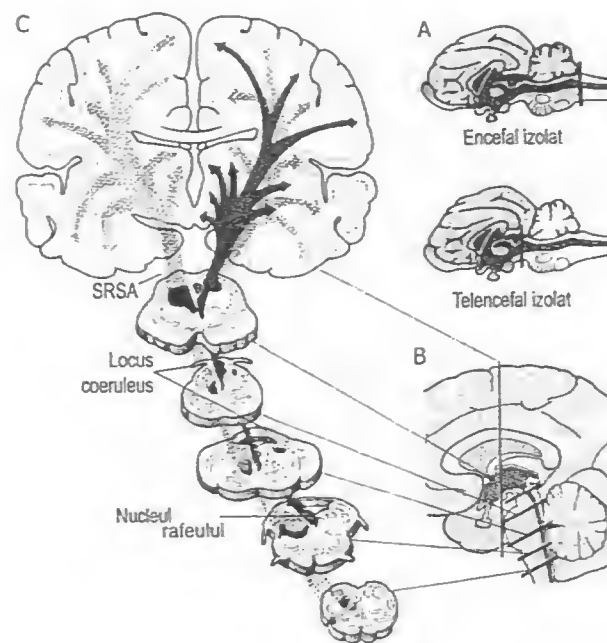


Fig. 20.15. Reprezentare schematică a structurilor nervoase centrale implicate în producerea etapelor somnului. A: encefal izolat. B: creier izolat. C: secțiune frontală transeisferică cu proiecție corticală a SRSA – pe stânga, și a nucleilor rafeului și locus coeruleus – pe dreapta (după Schmidt și Thews, 1989).

Dacă secțiunea trunchiului cerebral este mai înaltă, la nivelul corpurilor cvadrigemeni (*cerveau isolé*), traseul EEG prezintă numai unde lente sincronizate datorită îndepărtării principalelor aferențe senzoriale. Aceste constatări au fost întregite de rezultatele cercetărilor ulterioare asupra formațiunii reticulate din trunchiul cerebral. Plecând de la trezirea pisicilor somnolente prin stimularea electrică a formațiunii reticulare, s-a emis ipoteza participării acesteia la menținerea nivelului excitației necesare realizării stării de veghe. În funcție de fluctuațiile proiecțiilor ascendente reticulate se produc fenomene alternante de veghe-somn. Ulterior s-a precizat că stimularea electrică a formațiunii reticulate bulbo-protuberanțiale induce somn. S-a stabilit astfel că formațiunea reticulată participă în funcție de zona activată atât la realizarea stării de veghe, cât și a celei de somn.

Starea de veghe este responsabilă de menținerea conștiinței asupra mediului înconjurător și de integrarea informațiilor percepute prin modalități senzoriale. Spre deosebire de veghea calmă, care corespunde unei activități ritmice de tip alfa predominantă în regiunea occipitală, starea de veghe cu ochii închiși se caracterizează prin traseu EEG mixt de voltaj scăzut prevăzut cu mișcări oculare.

Teoria participării formațiunii reticulate mezencefalice la realizarea stării de veghe, propusă de Magoun și Moruzzi (1952), a fost întregită de cercetările asupra căilor ascendente și descendente ale veghii, cu conceptul implicării sistemului noradrenergic din locus coeruleus pontin. S-a constatat că blocajul eliberării noradrenalinei sau a receptorilor adrenergici diminuează starea de veghe, în timp ce amfetamina eliberatoare de catecolamine provoacă efecte inverse de agitație. În prezent, se admite că veghea este realizată și întreținută de o rețea complexă polineuronală de monoamine, glutamat și acetilcolină, ce se întinde în cascadă de la trunchiul cerebral inferior la telencefal și cortex (fig. 20.16).

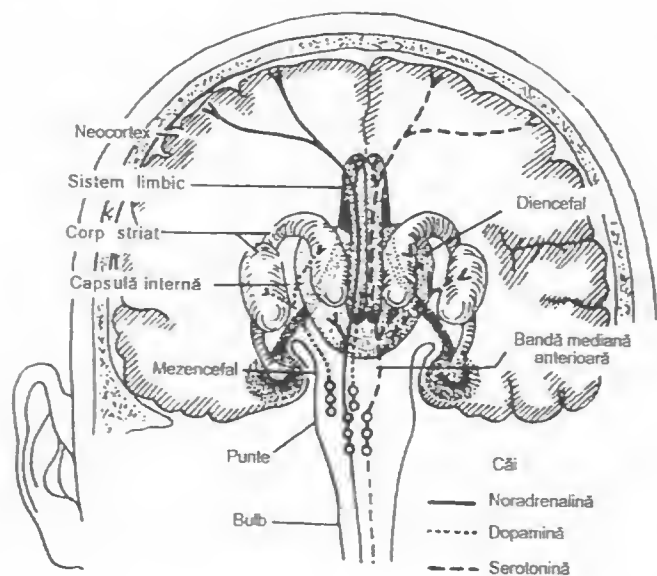


Fig. 20.16. Distribuția monoaminelor în creier.

Nucleul reticular magnocelular bulbar, cu conținut bogat în neuroni colinergici și aspartat-glutamatergici, proiectează pe formațiunea reticulată mezencefalică, hipotalamusul posterior și telencefal, formând calea reticulo-hipotalamo-corticală. Pe de altă parte, formațiunea reticulată mezencefalică, proiectând pe nucleii talamici, formează calea activatoare reticulo-talamo-corticală. La rândul lor, atât nucleul rafaelului anterior secretor de serotonină, cât și neurohormonii CRF, vasopresina și neuropeptidul NPY participă la modularea în sens activator a stării de veghe normală. Alte substanțe bioactive (prostaglandinele, interleukina-1 și factorul eliberator al hormonului de creștere) îndeplinesc rol de modulatori ai periodicității veghe-somn.

Alternanța ritmică veghe-somn este asigurată de participarea structurilor nervoase supraiacente din mezencefal, talamusul median și hipotalamusul anterior, prevăzute cu reactivitate diferită la diversele substanțe endogene inductoare de efecte hipnogene. La nivelul hipotalamusului anterior, de exemplu, se găsește nucleul suprachiasmatic cu rol de *pace-maker* endogen al ritmicității veghe-somn. La realizarea activității alternante a acestuia participă atât acetilcolina, catecolaminele și acidul glutamic, cât și acidul gamma-aminobutiric (GABA) ca neurotransmițător clor-dependent eliberat local de către neuronii nucleului respectiv. Spre deosebire de efectul predominant inhibitor cortico-subcortico-spinal, GABA posedă la nivelul nucleului suprachiasmatic proprietăți atât inhibitoare, cât și activatoare. În timpul nopții, GABA acționează ca neurotransmițător inhibitor, iar în timpul zilei determină efecte excitatorii de creștere a descărcărilor electrice neuronale. Participarea GABA la realizarea ritmicității diurne a somnului este pusă pe seama concentrațiilor mai mari ale clorului intracelular în timpul zilei decât în cursul somnului nocturn, ca urmare a variațiilor conductanței membranare neuronale.

În cazul fusuilor somnului lent sincronizat, acestea se datorează hiperpolarizărilor ciclice neuronale talamo-corticele. Undele lente sunt rezultatul sumării fenomenului de hiperpolarizare de la nivelul celulelor piramidale din stratul V cortical de către neuronii inhibitori GABA. Oscilațiile delta au la bază două componente: una neocorticală și alta talamică, sumate sub formă de descărcări simultane talamo-corticele.

Referitor la structurile și mecanismele nervoase centrale responsabile de somnul cu unde lente, acestea sunt reprezentate de neuronii GABAergici din nucleul reticular talamic, considerat un *pace-maker* inductor de hiperpolarizări ciclice talamo-corticele generatoare de unde EEG dispuse sub formă de fusuri. În general, undele lente sunt rezultatul sumării hiperpolarizărilor de la nivelul celulelor piramidale induse de neuronii GABAergici. Astfel, somnul cu unde lente este rezultatul inhibiției responsabile de starea de veghe și dezinhibiției *pace-maker*-ului talamic.

La rândul său, traseul electric desincronizat din timpul somnului paradoxal – REM, este rezultatul interacțiunii dintre rețeaua polineuronală executivă ponto-talamo-corticală și cea permisivă modulatorie. Prima realizează desincronizarea corticală cu participarea neuronilor colinergici ponto-mezencefalice și a nucleului reticular talamic. Activarea corticală a somnului paradoxal depinde atât de neuronii colinergici bulbo-pontini și aminoacidergici (glicină, GABA) cu proiecție difuză spre talamus și scoarță, cât și de rețeaua permisivă de neuroni monoaminergici (noradrenalină, dopamină, serotonină, histamină). Printr-un mecanism neurochimic insuficient precizat, adenoza rezultată din metabolizarea nucleotidelor energogene cerebrale participă ca neuromodulator la inducerea somnului fiziologic. Una din primele dovezi experimentale privind rolul hipnogen al adenozei a fost adusă de cercetările colectivului nostru și prezentate la Congresul Internațional de Fiziologie de la Paris (Haulică și colab., 1977). Ulterior, s-a demonstrat că adenoza continuă să crească în timpul veghii prelungite, acționând ca neuromodulator în sens inhibitor asupra stării de veghe, urmată de predispoziție la somn.

Numeroase alte substanțe biologice active (aminoacizi, neuropeptide, steroide, radicali liberi ai oxigenului, azotului și carbonului) își dispută candidatura la calitatea de mediator chimici, cotransmițători sau neuromodulatori implicați în realizarea alternanței veghe-somn.

20.8.4. MECANISME NEUROCHIMICE IMPLICATE ÎN SOMN ȘI VEGHE

Preocupări privind cauza somnului există încă din antichitate, când s-au emis diverse ipoteze dominate de nota mistică a vremii. La începutul secolului trecut, s-a atribuit CO_2 rol hipnogen, iar ulterior a fost înlocuită o hipnotoxină ca inductor al somnului.

Viziunea modernă a cauzelor somnului începe din primele decenii ale secolului al XX-lea cu Legendre și Pieron (1913), care au lansat ipoteza producerii în timpul stării de veghe a unei substanțe care produce somn. Lichidul cefalorahidian recoltat de la un câine privat de somn produce la câinele normal o perioadă de somn mai lungă comparativ cu animalul martor. Ei au conchis că o hipnotoxină era prezentă în LCR respectiv. Natura hipnotoxinei nu a putut fi stabilită. Introducerea tehnicilor EEG și bichimice moderne a precizat că neuronii și celulele gliale cerebrale produc și răspund la un mare număr de substanțe bioactive. Unele dintre acestea modifică descărcările electrice ale creierului, inducând somnul sau, din contră, produc o stare de veghe prelungită.

În ultimele decenii s-a izolat din sângele venos cerebral al iepurilor o substanță de natură proteică (Monnier și colab., 1964), care, injectată apoi intravenos sau în ventriculii cerebrali la alte animale, a determinat instalarea somnului pentru o perioadă de timp. Această substanță, a cărei structură chimică nu a putut fi încă precizată, a fost numită sugestiv „factorul hipnogen delta”.

Concomitent cu aceste studii care au pus în evidență factorul hipnogen în sângele efuent cerebral, cercetările întreprinse de grupul condus de Papenheimer (1965) studiază prezența unor eventuali factori hipnogeni în lichidul cefalorahidian. Acești cercetători au identificat în lichidul cefalorahidian al caprelor private de somn o proteină cu greutate moleculară mică (factorul S). Această substanță administrată la șobolani a crescut semnificativ durata somnului, dublată de scăderea activității motorii pentru o durată de aproximativ 6 ore.

Substanța respectivă este diferită de toate celelalte aproximativ 30 de substanțe mediatore din creier care-și dispută în prezent candidatura ca factori umorali ai somnului și veghii. Dintre acestea face parte, în primul rând, acetilcolina, având acțiuni neurosedative și hipnogene. Este știut faptul că formațiunile encefalice sunt foarte bogate în acetilolină și că pentru eliberarea acestui mediator Ca^{2+} este absolut necesar. Rolul Ca^{2+} în mediația colinergică din timpul somnului a fost demonstrat indirect de Marinescu, Sager și Kreindler, care au semnalat efectele hipnogene produse de administrarea intraventriculară de Cl_2Ca .

Principalii factori folosiți pentru codificarea chimică și echilibrul funcțional de către creierul uman sunt acetilcolina și noradrenalina. Prezența în cantități mari atât a enzimelor formatore, cât și inactivante pentru cele două substanțe mediatore, dublată de acțiunile lor antagonice la nivelul diverselor teritorii cortico-subcorticeale constituie argumente în favoarea unui asemenea punct de vedere.

Interesant este faptul că noradrenalina, ca și adrenalina, de altfel, acționează nu numai în sens activator la nivelul formațiunii reticulate mezencefalo-diencefalice, ci și în sens invers, inhibitor, în teritoriul reticulat pontin. S-au acumulat numeroase date care precizează că DOPA, noradrenalina și adrenalina sunt implicate în desfășurarea somnului paradoxal.

În prezent, datorită cercetărilor întreprinse de Jouvet și colaboratorii săi, se admite că, spre deosebire de faza paradoxală (profundă) a somnului, care pare a fi predominant catecolaminică, somnul superficial (lent) s-ar datora serotonininei (hormonul somnului). Între catecolamine și serotonină se pare că există un sinergism metabolic și funcțional. De reținut că monoaminoxidaza (MAO) este principala enzimă degradativă a ambelor amine biogene și că efectele lor hipnogene se însumează pentru a permite trecerea de la somnul superficial la faza sa profundă.

Somnul, ca fenomen activ, se datorează, după Jouvet (1972), acțiunii inhibitorii succesive a serotonininei și catecolaminelor din trunchiul cerebral, mai exact din nucleii ponto-reticulat oral și caudal al formațiunii reticulate pontine.

Abolirea activității conștiente corticale în somnul fiziologic s-ar datora, după această concepție, inhibării formațiunii reticulate activatoare ascendente de către acești nuclei, cu participarea serotonininei și a catecolaminelor ca factori determinanți ai intrării în stare de hiperactivitate a sistemului hipnogen ponto-reticulat. Fenomenul de suprimare temporară a funcțiilor conștiente de relație din cursul somnului nu înseamnă, așadar, lipsa de activitate cerebrală sau simpla deaferentare produsă prin blocarea pasivă a sistemului reticulat activator ascendent de către hipnotoxinele fatigante, cum se credea altădată. Putem considera, deci, că somnul este un proces neurochimic activ, la care participă aminele biogene inhibitorii de la nivelul trunchiului cerebral, cu răsunet corespunzător atât ascendent, cât și în sens descendent.

Dintre celelalte substanțe biologice active prezente în jesutul cerebral, este de reținut acidul gamma-aminobutiric (GABA), rezultat din decarboxilarea acidului glutamic. Concentrația sa crește în timpul somnului, grăbind apariția de unde lente caracteristice primei faze a acestuia. GABA acționează prin derivatul său hidroxilat și gamma-butilolactona prevăzută cu acțiuni inhibitorii mai puternice.

De un interes teoretic și practic crescând se bucură în ultimul timp nucleotidele ciclice, ca mesager biochimic posibil al efectelor neurohormonale exercitate de catecolamine, serotonină și hormoni, în general. În timp ce acțiunile centrale ale catecolaminelor par mediate la nivel neuronal de cAMP, cele ale acetilcolinei se realizează cu participarea cGMP. S-a observat mai întâi că privarea de somn paradoxal se însoțește de creșterea conținutului în adenozină al creierului, iar administrarea adenozei în ventriculii cerebrali este urmată de apariția somnului cu particularități comportamentale și electrice caracteristice.

Privațiunea de somn este utilizată astăzi ca metodă de studiu, în scopul descifrării bazelor metabolice și umorale ale somnului. La voluntari s-a putut prelungi privațiunea de somn până la 264 de ore. Dezechilibrele metabolice și alterările histo-chimice care survin se aseamănă foarte mult cu cele descrise în bolile mintale.

Din această foarte succintă trecere în revistă a factorilor neuronali implicați în apariția stării de somn, rezultă că, deși nu s-a făcut încă pasul hotărâtor în domeniul cunoașterii mecanismelor biochimice intime de producere a somnului, există suficiente date experimentale care pot fi utilizate ca bază de plecare pentru cercetări viitoare.

20.8.5. ACTIVITATEA HIPNICĂ – VISELE

Până nu demult, visele au fost considerate ca parte integrantă a somnului, în care evenimente, gânduri, emoții și imagini sunt percepute ca reale. Metodele moderne de investigare a somnului și, îndeosebi, cercetările electroencefalografice au dat un nou impuls studiului viselor.

Acestea au stabilit că visele, ca expresie a activității psihice din timpul somnului, se produc în proporție de 80% în timpul somnului paradoxal REM și numai 20% în somnul cu unde lente – non-REM.

La rândul său, acidul glutamic sub formă de glutamat, ca precursor al GABA, este larg distribuit la nivelul structurilor nervoase cortico-subcorticeale, îndeplinind, împreună cu aspartatul, rol de principal neurotransmițător excitator, prin intermediul receptorilor membranari ionotropi (NMDA și AMPA) și metabotropi specifici. Primii realizează activarea canalelor ionice voltaj-dependente pentru principalii cationi monovalenți (Na^+ și K^+), însoțită de intrarea concomitentă a calciului, iar cel de-al doilea își exercită acțiunea prin intermediul proteinelor G membranare și al mesagerilor secunzi (DAG și IP_3) reglatori ai metabolismului neuronal postsinaptic.

Hipocretina, denumită și orexină, este un neuropeptid prevăzut de asemenea cu proprietăți excitante asupra principalelor zone nervoase cerebrale, descoperii de Lecea și colab. (1998) în neuronii hipotalamusului lateral. Efectele sale neurostimulante centrale contribuie la producerea stării de activare corticală și veghe prelungită. Lipsa hipocretinei predispune la tulburări narcoleptice și obezitate prin hiperfagie. Atât somnolența postprandială, cât și insomnia indusă de foame se însoțesc de dezechilibre secretorii de hipocretină, generate de variațiile glicemiei sanguine, inclusiv cerebrale (Burdakov și Alexopoulos, 2005).

Deși s-a stabilit o strânsă legătură între somnul paradoxal și vise, nu s-a putut pune semnul egalității între cele două stări fiziologice, întrucât nu se visează de fiecare dată când apare faza de somn profund.

La rândul său, acidul glutamic sub formă de glutamat, ca precursor al GABA, este larg distribuit la nivelul structurilor nervoase cortico-subcorticeale, îndeplinind, împreună cu aspartatul, rol de principal neurotransmițător excitator, prin intermediul receptorilor membranari ionotropi (NMDA și AMPA) și metabotropi specifici. Primii realizează activarea canalelor ionice voltaj-dependente pentru principalii cationi monovalenți (Na^+ și K^+), însoțită de intrarea concomitentă a calciului, iar cel de-al doilea își exercită acțiunea prin intermediul proteinelor G membranare și al mesagerilor secunzi (DAG și IP_3) reglatori ai metabolismului neuronal postsinaptic.

Problema apariției viselor în funcție de somnul REM poate fi abordată din mai multe puncte de vedere. Apariția și durata somnului REM variază în limite largi la diferite specii de animale. La reptile, de exemplu, somnul REM este absent, la păsări reprezintă aproximativ 0,6% din totalul somnului, la rozătoare 6,6%, la rumegătoare 15%, iar la carnivore și om circa 20%. Variații importante există și în

funcție de vârstă, fiind mai mare la nou-născuți decât la adulți și vârstnici. La rândul său, aspectul calitativ al viselor produse în somnul REM este diferit de acela al viselor din somnul non-REM. În timp ce visele din somnul REM au un grad mare de dinamism, cele din timpul somnului non-REM, fiind asemănătoare cu gândurile sau afectele, au caracter predominant introspectiv. Visele obținute în urma trezirii din somnul non-REM au conținut mai bogat în informații din viața reală decât cele produse în somnul paradoxal REM, în care predomină bizareriile sau diferite coșmaruri. Constând dintr-un ansamblu de imagini sau idei incoerente ce aparțin sferei subconștientului, interpretarea lor este dificilă, fiind considerată importantă mai ales în psihanaliză. În prezent, deși se admite că mentația produsă în somn sub formă de vise este un epifenomen al somnului REM, majoritatea autorilor consideră că activitatea onirică poate lipsi în prezența acestuia.

Cât privește structurile neuroanatomice implicate în producerea și modularea viselor, s-a stabilit că acestea sunt comune în mare parte cu ale somnului paradoxal REM, generat de nucleii ponto-pedunculari și latero-dorsali tegmentali de la nivelul punții. Acestea generează unde pontine fazice (PGO) ce proiectează în corpii geniculați laterali din talamus și scoarța occipitală, folosind acetilcolina ca principal mediator chimic.

S-a constatat că leziunile locale de la nivelul lobului occipital diminuează producerea viselor. Mecanismele de activare subcorticală ponto-geniculo-occipitale se extind la hipotalamus, ganglionii bazali și amigdală, proiectând difuz pe scoarță. În timp ce hipotalamusul anterior deține un rol fundamental în asigurarea periodicității veghe-somn prin nucleul suprachiasmatic, descărcările tonice de tip histaminergic ale neuronilor din hipotalamusul posterior participă la reacțiile neuro-endocrine de trezire corticală și de menținere a conștienței. La rândul lor, nucleii bazali intervin prin intermediul acetilcolinei la modularea generatorului pontin din somnul REM, iar amigdala conferă prin mecanism serotoninergic încărcătura emoțională a trezirii din somnul REM. Astfel, visele ca procese mentale active sunt generate la nivelul creierului anterior (proencefal) și proiectate pe cortexul frontal prin mecanism predominant dopaminergic.

În general visele din somnul non-REM au un conținut mai bogat din viața reală decât în cazul viselor produse în somnul paradoxal REM.

În majoritatea cazurilor, visele sunt reținute la trezirea subiectului din somn.

Aparținând sferei subconștientului, activitatea mentală din timpul somnului constituie încă obiectul unor opinii și teorii controversate. Dintre teoriile și modelele cognitive propuse pentru producerea viselor rețin deocamdată atenția modelul de activare corticală de către undele pontine fazice (PGO) și modelul neuro-psihologic al circuitelor polineuronale implicate în procesarea conținutului emoțional al viselor.

20.8.6. STAREA DE VIGILENȚĂ

După trezirea spontană sau provocată apare starea de vigilență. Vigilența reprezintă un nivel foarte ridicat de eficacitate fiziologică a organismului și care îi dă acestuia posibilitatea să fie informat cu tot ce se întâmplă în mediul extern și intern, în vederea adaptării la circumstanțele în care se găsește.

În vorbirea curentă, a fi în stare vigیلă înseamnă a urmări foarte de aproape evenimentele care îl privesc (atenție), în vederea unui eventual răspuns (reacția de alertă) sau care îi acordă posibilitatea organismului de a pregăti cu grijă ceea ce are de făcut. În acest context, starea de veghe prezintă grade diferite de vigilență, care se întind de la repausul vigیل (destindere, relaxare), până la cea mai înaltă concentrare mintală.

Mecanismul stării vigile se confundă cu al stării de veghe.

Ceea ce trebuie menționat este faptul că formațiunea reticulată prin mecanisme de *feed-back* gradează vigilența în funcție de stimulii din mediul extern, de activitatea somatică și vegetativă, de modificările compoziției chimice a mediului intern etc. Putem grupa, astfel, factorii care intervin în realizarea stării vigile în două grupe: senzitivo-senzoriali, ca urmare a recepționării diversilor stimuli, și hormonal – umorali, între care intervenția adrenalinei este capitală.

După cum s-a văzut, formațiunea reticulată nu intervine în exclusivitate la realizarea stării de veghe, ea se comportă ca un colector al nenumăratelor mesaje ascendente în vederea activării cortexului cerebral, dar, în același timp, ea primește influențe corticale care exercită rol de supremație. Telencefalul nu răspunde pasiv la incitațiile activatoare ale formațiunii reticulate, el participă prin activitatea sa la producerea stării de veghe.

Și alte structuri participă la apariția stării de veghe și la întreținerea ei. Dintre acestea, un rol important îl are hipotalamusul posterior.

20.8.7. PERIODICITATEA NICTEMERALĂ A STĂRILOR DE VEGHE ȘI SOMN

Stările de veghe și somn se realizează la homeoterme datorită ritmului solar, așa încât majoritatea celor care sunt în stare de veghe în cursul zilei dorm noaptea. Acest ritm este mai puțin evident la așa-zisele animale nocturne. La om, viața în colectiv, obișnuințele sociale și individuale, împrejurările zilnice fac să varieze orarul somnului.

De fapt, alternanța stărilor de veghe și de somn se înscrie într-un aspect mult mai general, al așa-numitelor ritmuri nictemerale sau circadiene. La mamifere, în afară de alternanța între starea de veghe și cea de somn, a variațiilor periodice ale activităților motorii și intelectuale, consecință a acestora, se cunosc în jur de 40 de alte ritmuri. Dintre acestea, menționăm pe cele ale temperaturii centrale, frecvenței cardiace și respiratorii, consumului de oxigen, metabolismului de bază, nivelului glicemiei, eliminărilor urinare, sudorației, secreției corticosuprenale, vitezei de multiplicare a celulelor în diverse țesuturi etc.

Schematic, putem distinge două tipuri de ritmuri zilnice:

- ritmuri exogene, întreținute de variațiile nictemerale ale factorilor din mediul extern;
- ritmuri endogene, întreținute de organismul însuși. Totul se petrece ca și cum un „orologiu intern” reglează periodicitatea circadiană a funcțiilor. „Orologiul intern” se derulează în raport cu timpul astronomic.

Totuși, factorii din mediul extern au o importanță deosebită pentru aceste ritmuri endogene. Astfel, la oamenii care au rămas o perioadă mai lungă de timp în subteran s-a produs un defazaj progresiv al mai multor ritmuri raportate la perioada de 24 de ore a timpului local. Factorii din mediul extern se comportă ca sincronizatori, ei nu creează ritmuri biologice, dar le subordonează ritmului nictemeral (solar). Viața socială este pentru om cel mai puternic sincronizator, integrând fazele de activitate și cele de repaus în perioada de 24 de ore și repartizându-le pe baza alternanței zi-noapte cu ajutorul ceasului biologic. Cel mai elocvent exemplu este dat de activitatea oamenilor în regiunile arctice, unde lumina solară este aproape continuă. Factorul timp deține un loc important și în patologie.

Deci, expresia de „orologiu intern” nu poate avea sens fiziologic, întrucât nici un mecanism nervos sau umoral nu poate crea singur ritmuri circadiene. Acestea sunt autoîntreținute în fiecare celulă, țesut sau organ, contractând diferite legături între ele.

Alternanța între starea de veghe și cea de somn este cel mai evident ritm în ceea ce privește periodicitatea zi-noapte.

Starea de veghe și conștiență. Conștienta este sentimentul pe care îl are orice subiect despre mediul extern, organismul său și despre „Eul” său. Cunoașterea lumii externe este rezultatul activității reflectorii a organelor senzoriale, care sunt capabile să recepționeze excitanții din mediu și să-i transforme în senzații (cortexul cerebral). În funcție de semnificația lor, motivație și gradul de repetiție, acestea vor fi integrate prin atenție, interes și judecată înainte de a fi memorizate. Recunoașterea corpului și a componentelor sale este rezultatul unor senzații subconștiente sau extraconștiente interne (anestezice) și externe, care conferă fiecărui individ imaginea propriului organism și, de asemenea, îi furnizează informații asupra comportamentului față de sine însuși și față de mediul în care trăiește. Prin conștienta „Eului” se înțelege capacitatea de gândire, cu raționamentul și logica proprie, cu deducțiile creatoare ale vieții interioare și de conducere a actelor voluntare. Toate aceste procese au cea mai înaltă manifestare sub forma limbajului vorbit sau scris, specific numai omului. Aceste stări majore ale conștienței sunt produsul activității nervoase superioare, făcând posibile gândirea, ideea și inteligența pe baza informațiilor sociale, a integrării și a prelucrării lor.

Rezultă că între starea de veghe și conștiință există legături foarte strânse, întrucât una din manifestările de bază ale somnului este tocmai ruperea temporară a organismului de lumea exterioară.

Starea de veghe este un fenomen fiziologic cu substrat morfologic, localizat la nivelul creierului, în timp ce conștiința este un fenomen psihologic fără substrat morfologic, dar care este rezultatul celor mai înalte procese de integrare nervoasă.

20.9. REGLAREA COMPORTAMENTULUI ALIMENTAR

În condiții de sănătate, există un echilibru perfect între nevoile organismului în substanțe alimentare și aportul acestora, echilibru reglat pe cale neuro-umorală, cu participare atât somatică, cât și vegetativă. Aportul alimentar este controlat de un mecanism pondero-static de scurtă și de lungă durată.

Mecanismul de scurtă durată asigură controlul ingestiei de hrană cu ocazia fiecărui prânz, prin intermediul cuplului foame-sațietate.

Mecanismul de lungă durată asigură echilibrul dintre depunerea de rezerve tisulare a factorilor nutritivi și mobilizarea acestor rezerve în vederea utilizării.

20.9.1. MECANISMUL DE SCURTĂ DURATĂ AL REGLĂRII APORTULUI ALIMENTAR

Comportamentul alimentar este polarizat în jurul a trei senzații majore, și anume: foamea, sațietatea și setea (aceasta din urmă va fi tratată separat).

Ca semn subiectiv al necesității obiective de alimentare, foamea este cunoscută prin necesitatea imperioasă a ingerării de alimente, asociată cu o stare de încordare generală și chiar de agitație, irascibilitate, senzație de gol, apăsare sau durere epigastrică, datorate contracțiilor în gol ale stomacului.

În condiții de privațiune alimentară, foamea se accentuează în primele zile, însă cu timpul dispare. Consumul de alimente în cantitate suficientă duce la dispariția senzației de foame și înlocuirea ei cu o altă senzație de plăcere, euforizantă, numită sațietate. Apariția acestei senzații limitează consumul de alimente și nu permite depășirea posibilităților digestive și metabolice ale organismului.

Cercetările mai vechi, efectuate de Cannon, cu privire la mecanismul senzației de foame au justificat apariția acesteia datorită mișcărilor foarte vii ale stomacului și creșterii presiunii intragastrice. S-a dovedit însă că peristaltica gastrică exagerată reprezintă doar un fenomen asociat senzației de foame. S-a încercat apoi să se explice senzația de foame prin hipoglicemie. Teoria nu a fost admisă la timpul respectiv datorită imposibilității de a explica faptul că diabeticii care au glicemia crescută prezintă totuși o senzație imperioasă de foame. Studii de fiziologie, devenite acum clasice, au arătat că rolul decisiv în apariția senzației de foame îl are participarea obligatorie a unui centru situat în hipotalamusul lateral (HL). Lezarea experimentală a acestuia determină afagie, slăbire și moarte prin inaniție.

În cazul stimulării sale, se produc efecte inverse, de hiperfagie și îngrășare. În hipotalamusul lateral soses informații atât prin aferențele senzoriale periferice (olfactive, gustative, vizuale etc.), cât și de la nucleul ventro-median din hipotalamusul mijlociu (HM), acesta din urmă fiind considerat ca al doilea centru implicat în ingestia de alimente (fig. 20.17).

Dacă la animalele de experiență se distrug nucleii ventro-mediani ai hipotalamusului din regiunea tubercinereum-ului și nucleul paraventricular din hipotalamusul anterior, se constată că animalele devin obeze datorită creșterii nevoii de a mânca (hiperfagie și obezitate hipotalamică). S-a stabilit, astfel, că în timp ce hipotalamusul lateral conține centrul foamei („start feeding”), hipotalamusul antero-median este sediul centrilor sațietății („stop feeding”).

Informațiile sosite pe cale aferentă, nervoasă sau umorală determină centrul foamei să solicite pe căi eferente inițierea de acte somato-vegetative motorii și secretorii, necesare procurării, ingerării și digestiei alimentelor. Când ingestia a atins un anumit grad de distensie gastrică și încărcare metabolică, pe aceleași căi aferente sunt stimulați centrul sațietății, care, acționând în sens inhibitor asupra primilor, limitează aportul alimentar. Rolul inhibitor al centrilor sațietății asupra centrilor foamei este dovedit de faptul că

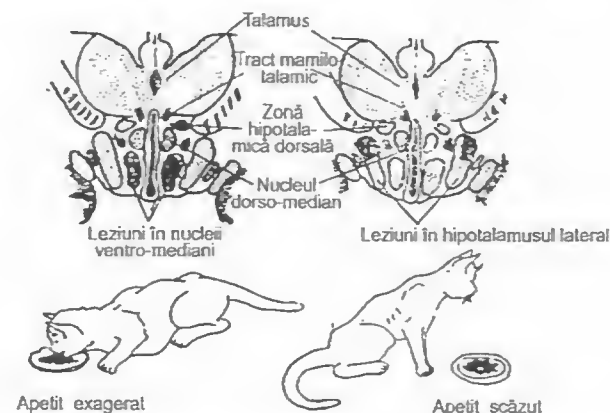


Fig. 20.17. Efectul leziunilor hipotalamice asupra comportamentului alimentar.

simpla întrerupere a releelor neuronale dintre hipotalamusul median și lateral, prin secționare, duce la dezinhibiția acestora din urmă și la obezitate. De asemenea, distrugerea centrului foamei, asociată simultan cu leziuni ale centrului sațietății, determină anorexie (lipsa dorinței de alimentare), adică manifestări identice cu cele obținute prin lezarea numai a centrului foamei, ceea ce întărește ideea că centrul sațietății funcționează prin inhibarea centrului foamei.

Rezultă, astfel, că centrul foamei este cronic activ și că activitatea sa este intermitent inhibată de activitatea centrului sațietății după ingestia de alimente.

Nu este sigur, totuși, dacă centrul foamei și al sațietății exercită numai un simplu control al ingestiei. Astfel, șobolanii cu leziuni hipotalamice ventro-mediane bilaterale au prezentat obezitate chiar în condițiile administrării unei cantități reduse de hrană. Dacă animalele lezate au acces liber la hrană, dorința de a se alimenta preferențial (apetul) operează substanțial în vederea menținerii creșterii în greutate. Dacă aceleași animale au fost făcute mai obeze prin alimentare forțată, consumul lor spontan de alimente scade ulterior și, odată cu el, greutatea corporală. În inaniție, consumul alimentar spontan crește până când se recâștigă greutatea corporală pierdută. Aceste fapte au avansat teoria că hipotalamusul este mai degrabă un centru de reglare („set point”) al greutății corporale, decât al ingestiei de alimente, ce ar constitui numai unul din instrumentele cu care operează (Stricker, 1978).

Apetitul este dorința de a ingera un anumit aliment, spre deosebire de foame, care reprezintă necesitatea de a mânca, în general. Apetitul are o componentă psihică mai importantă decât foamea, și, spre deosebire de foame, care se însoțește de o senzație dezagreabilă, el este însoțit de senzația agreabilă de ingerare a alimentelor.

Activitatea centrilor foamei și al sațietății este guvernată în mare măsură de mecanisme aferente. Astfel, factorii care asigură trecerea de la apetit la sațietate sunt reprezentați de semnale datorate excitației receptorilor specifici de la nivelul porțiunii superioare a tubului digestiv, stomacului și vaselor portale hepatice. Foamea, la rândul ei, este determinată, cel puțin în parte, în afara mesajelor aferente gastro-intestinale și hepatice datorate lipsei substanțelor nutritive în aceste organe, și de un mecanism aferent glicemic. Este dovedit astăzi că nivelul de activitate al centrilor hipotalamici ventro-mediani este dependent de nivelul utilizării glucozei de către unii neuroni ai acestora (glucosenzori), totalitatea cărora formând glucostatul.

Ori de câte ori diferența arterio-venoasă a glicemiei scade sub 15 mg/dl apare senzația de foame. Acest fapt este explicat de teoria glucostatică prin aceea că, în condițiile hipoglicemiei, celulele neuronale hipotalamice ventro-mediane (centrul sațietății) prezintă o scădere a nivelului lor de activitate,

ceea ce duce la diminuarea inhibiției pe care o exercită asupra hipotalamusului lateral (centrul foamei). Scăpat de sub acțiunea impulsurilor inhibitoare, acesta va declanșa comportamentul alimentar corespunzător stării de foame.

În cazul ajungerii la valorile normale ale glicemiei, nivelul de activitate a nucleilor hipotalamici ventro-mediani este înalt și ei își exercită acțiunea de inhibare a hipotalamusului lateral, favorizând astfel senzația de sațietate.

Înregistrarea potențialelor de acțiune din centrul hipotalamic după injectarea intravenoasă de glucoză a arătat o creștere a frecvenței descărcărilor în nucleii ventro-mediani (nivel crescut de activitate), pe când în nucleii din hipotalamusul lateral s-a constatat reducerea acestora (stare de inhibare). Fenomenele se prezintă invers după administrarea de insulină. Experimentele au dovedit că centrul hipotalamic ventro-mediani, spre deosebire de restul creierului, utilizează glucoza numai în prezența insulinei din circulație. În lumina acestei constatări, se explică astăzi de ce diabeticii, cu toate că prezintă hiperglicemie, au o senzație permanentă de foame datorată insuficienței insulinice, insuficiență care reduce fixarea glucozei în centrul sațietății, coborând astfel nivelul de activitate a acestor neuroni (asemănător condițiilor create de hipoglicemie) și producând dezinhibarea hipotalamusului lateral.

Utilizând glucoză marcată, s-a confirmat capacitatea centrilor ventro-mediani de a concentra glucoza, capacitate inexistentă în alte zone ale hipotalamusului. Această mare afinitate pentru glucoză explică obezitatea apărută la șoareci ca urmare a administrării sării de aur a tioglucozei, ce distruge toxic acești neuroni glucocaptatori.

20.9.1.1. Alte mecanisme reglatoare ale comportamentului alimentar

La producerea reacțiilor complexe din cadrul comportamentului alimentar, o participare deosebit de importantă o are motivația psiho-afectivă de origine reflexă cortico-subcorticală, al cărei substrat material este reprezentat de o serie de formațiuni nervoase, căi și neurosecreții.

Din asocierea și interpenetrarea acestora rezultă un șir de senzații și reacții neuro-vegetative, la baza cărora stau fenomene complexe de integrare diencefalo-rinencefalică, descifrate în mare măsură datorită experimentelor de excitare și distrugere chimică sau chirurgicală a unor zone din sistemul limbic.

Motivația activează, direcționează și integrează manifestările omului în procesul de alimentare. Ea este inițiată de pornirea (dorința) la acțiune, care în comportamentul alimentar este determinată de foame. La rândul ei, aceasta este cauzată atât de dezechilibrul homeostazic (glucoză, acizi grași etc.), cât și de semnale nervoase ascendente de la stomac și intestin, ambele stări create prin lipsa sau aportul insuficient de alimente.

După ingestia alimentelor se instalează starea psiho-afectivă de recompensă-răspplată, trăită subiectiv ca plăcere (în cazul de față, ca sațietate), care încheie ciclul acestui proces important.

Starea de plăcere sau neplăcere (foame) a fost reprodusă în laborator la animale prin tehnica de autostimulare cu ajutorul electrozilor implantați în diferite zone ale creierului.

Astfel, stimularea hipotalamusului median determină starea de răspplată-recompensă („reward“), în timp ce în stimularea hipotalamusului lateral se obține starea de suferință-pedepsire („negative-reward“).

Ambele stări sunt manifestări funcționale emoționale sau de expresie, al căror substrat nervos este reprezentat în mare parte de sistemul limbic (rinencefal) în strânsă legătură cu hipotalamusul și talamusul, la care sosesc aferențele senzoriale specifice (circuitul Papez).

Dacă girosul cinguli și cornul Ammon (hipocamp) asigură interfața sistem limbic-hipotalamus, în ceea ce privește coloritul afectivo-emoțional al comportamentului alimentar, aceleași structuri limbice împreună cu alte formațiuni ale rinencefalului (nucleul accumbens, amigdala) realizează interfața cu manifestările motorii ale acestui comportament.

Neuronii de proiecție corticală ai analizatorului vizual potențați de locus coeruleus sunt legați prin fibre de asociație de cortexul infratemporal, de la care pleacă fibre spre amigdala, iar de aici spre cortexul frontal, hipotalamus și, îndeosebi, la nucleul accumbens. Din nucleul accumbens, proiecțiile fac legătura cu hipotalamusul lateral, substanța neagră și aria tegmentală ventrală și retur, creând unele circuite închise și, de asemenea, cu partea ventrală a globus pallidus din corpul striat, care face parte din sistemul motor extrapiramidal.

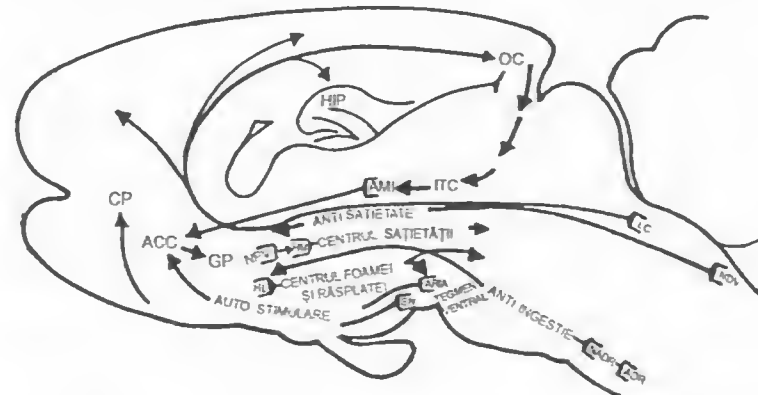


Fig. 20.18. Reprezentarea schematică a unor regiuni, căi și funcții implicate în comportamentul alimentar la șobolan. HIP, hipotalamusul. CP, cortexul parietal. OC, cortexul optic. ACC, nucleul accumbens. GP, globus pallidus. AMI, amigdala. ITC, cortexul infratemporal. LC, locus coeruleus. NPV, nucleul paraventricular. NDV, nucleul dorsal al vagului. SN, substanța neagră. ILL, hipotalamusul lateral. HM, hipotalamusul median. NADR, noradrenalina. ADR, adrenalina.

Alături de corpii striati, un rol important în manifestările motorii alimentare îl joacă nucleul ventral anterior talamic, de asemenea componentă a sistemului extrapiramidal.

Există dovezi (Mogenson, 1980) privind rolul dopaminei din accumbens în facilitarea scurgerii informațiilor senzoriale din sistemul limbic spre globus pallidus, care activează căi talamice ascendente și motorii extrapiramidale, potențând arcuri senzorio-motorii ce orientează mental și comportamentul animalului spre răspлата alimentară. La aceasta se adaugă sistemul ascendent dopaminergic din substanța neagră spre caudat-putamen, ce inițiază activitatea și orientarea animalului spre aliment (fig. 20.18).

Vederea unui aliment preferat determină alertarea cortexului vizual și codificarea formei acestuia de către cortexul infratemporal; amigdala codifică principalele calități ale alimentului, hipocampus îl localizează în spațiu și memorie, iar cortexul frontal determină selecția bazată pe activitatea de integrare a tuturor acestor date efectuate de către celulele neuronale corticale stimulate.

Decizia de a acționa este probabil trimisă de nucleul dorsal caudat, ce declanșează un program motor specific (dacă dopamina este abundentă), și de caudat ventral și accumbens pentru desăvârșirea până la capăt a programului generator de plăcere (succesul acțiunii). Sistemul dopaminergic nigro-striat este necesar, de asemenea, pentru alimentare, distrugerea sa făcând parte din sindromul de inanție hipotalamic.

Lipsa dopaminei în nucleul caudat și putamen determină tulburări ale acțiunilor motorii și comportamentale alimentare (afagie, indifferență senzorială) sau indifferență față de răspplată (lipsa dopaminei în accumbens). În schimb, conținutul crescut de dopamină în caudat-putamen poate potența circuitele motorii activatoare inutile (comportamente compulsive stereotipe).

Stimularea eliberării dopaminei din accumbens (de exemplu, cu amfetamină sau electrozi implantați) determină sațietate, anorexie sau, respectiv, autostimulare excesivă pentru obținerea și menținerea stării de răspplată, în timp ce administrarea prin injecție intrahipotalamică-laterală dă hiperfagie și obezitate.

De fapt, este cunoscut că sistemul dopaminergic intervine în toate tipurile de comportament prin autostimulare, dopamina din accumbens fiind în acest sens o zonă de mediație importantă.

Legat de sistemul dopaminergic limbic, este acum explicabil de ce neurotensina constituie un peptid tip „răspplată“, punându-se în evidență receptori de neurotensina pe neuroni dopaminergici (Palacios, 1981).

O altă structură rinencefalică implicată în comportamentul alimentar este amigdala. Participarea acesteia a fost dovedită, în afară de implicarea ei în circuitele limbico-motorii menționate, și prin leziuni

ale nucleilor amigdaeni. Distrugerca lor determină hiperfagie moderată, totuși, spre deosebire de animalele cu leziuni hipotalamice ventro-mediane, cele la care s-a lăsat amigdala se alimentează chiar și cu alimente alterate. Ele prezintă omnifagie, pierd capacitatea de diferențiere și selecție a alimentelor, mâncând orice li se oferă, ceea ce trădează un mecanism diferit de hiperfagia hipotalamică.

În afara datelor de reglare prezentate mai sus, în ultimul timp a fost dovedită existența a două căi secundare, teoretic necesare, dar nu suficiente, ce controlează motivația ingestiei prin integrarea unor semnale interne (plenitudinea gastrică, gustul) și care participă la „construirea” comportamentului alimentar. Astfel, se descrie, în paralel cu activitatea dualistă clasică a centrilor hipotalamici ai foamei și sațietății, existența a două căi modulatorii, și anume o cale a antisățietății și o cale a antiingestiei (Grnssman, 1960). Calea antisățietății, noradrenergică, este reprezentată prin fibre ce pleacă din nucleul dorsal al vagului și ajung la nucleul hipotalamic paraventricular din hipotalamusul anterior, descărcarea noradrenalinică având rol inhibitor asupra acestuia. Calea antiingestiei (adrenergică, noradrenergică și dopaminergică) este formată din fibre ce pleacă din neuroni catecolaminergici ai etajelor nervoase inferioare pe calea fasciculelor adrenergice ascendente până în regiunea perifornică a hipotalamusului lateral, descărcarea aminelor respective având rol inhibitor pe regiunea respectivă (vezi fig. 20.13).

Conform acestei teorii, administrarea de alimente în tubul digestiv al șobolanului ar determina sațietate, prin impulsuri gastrice și intestinale ce inhibă eliberarea noradrenalină în nucleul paraventricular (dezinhizarea intrahipotalamică a sațietății), și creșterea eliberării catecolaminelor în hipotalamusul lateral (inhibarea centrului foamei). În acest mod, deficitul în biosinteza catecolaminelor pe căile ascendente adrenergice din hipotalamusul lateral poate fi unul din factorii determinanți ai obezității la om.

În afara monoaminelor biogene, în reglarea neurochimică a comportamentului alimentar s-a evidențiat participarea peptidelor opioide.

Peptidele opioide hipotalamice participă la inițierea ingestiei de alimente, fapt semnalat de Guidotti (1977), care a arătat cum consumul de alimente este stimulat de administrarea de beta-endorfină sau neorfină în nucleul paraventricular. Margules (1978) evidențiază că obezitatea este asociată cu niveluri înalte de beta-endorfină. Creșterea beta-endorfinelor hipofizare la șobolani cu obezitate genetică ar determina ingestia de alimente prin mecanism central și periferic. Mecanismul central hipotalamic opiat ar fi implicat în motivația comportamentului alimentic și s-ar explica prin activarea transserotoninergică și transgabaergică a receptorilor diazepamici ce stimulează ingestia de hrană. Mecanismul periferic stimulează hiperinsulinemia și, secundar, creșterea ingestiei de alimente asociată cu inhibarea sațietății.

Obezitatea determinată de stres, ce conține și o importantă compoentă dopaminergică nigro-striată, ar putea fi explicată prin niveluri cronice ridicate de peptide opioide, ce induc stimularea ingestiei de alimente.

O serie de peptide neopioide din clasa hormonilor digestivi prezenți atât în intestin, cât și în creier acționează în controlul ingestiei. Colecistokinina, de origine periferică, facilitează digestia grăsimilor favorizând creșterea nivelului seric al acestora, cu rol în inducerea sațietății. Vagotomia subdiafragmatică blochează efectul de sațietate produs de colecistokinină. Un rol similar de inhibare a ingestiei i s-a descris și colecistokininei din nucleul paraventricular hipotalamic.

În același timp, CCK prezintă în balans și efecte opuse, fiind unul din factorii activi ai secreției de insulină (*insulin releasing factor*).

Neurotensina eliberată de mucoasa duodenală, care crește rata digestiei grăsimilor prin favorizarea uoi peristaltism lent, cât și cea cerebrală, prin inhibarea eliberării de noradrenalină în nucleul paraventricular, au acțiuni de reducere a ingestiei de alimente. Un rol similar i s-a descris bombesinei în hipotalamusul lateral și serotonininei din hipotalamusul ventro-median.

Scăderea *turnover*-ului acestor peptide digestive de origine cerebrală s-a dovedit că determină dezinhizarea neurochimică a ingestiei, asemănătoare cu cea obținută prin lezarea nucleilor ventro-mediani și paraventricular.

Se discută chiar posibilitatea existenței de neurotransmițători specifici implicați în orientarea și alegerea alimentelor în funcție de preferințe (alimente dulci, grase, acre, sărate etc.).

Dintre alți factori care contribuie la reglarea aportului, menționăm acțiunea dinamic-specifică a alimentelor, deshidratarea celulară și secreția gastrică care favorizează sațietatea.

Distensia tractului gastro-intestinal inhibă ingestia de alimente, în timp ce contracțiile o stimulează (fig. 20.19). Mecanismele reflexe digestive participă la realizarea ritmului de alimentare.

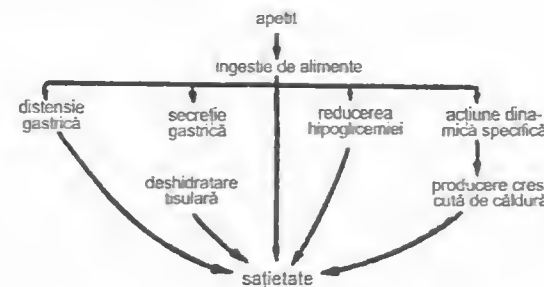


Fig. 20.19. Factorii trecerii de la apetit la sațietate.

În anumite condiții, mecanismele termoreglatoare pot afecta ingestia de hrană independent de rezervele energetice de care dispune organismul, constatându-se existența unei corelații negative între temperatura ambiantă și ingestia de hrană. Creșterea temperaturii nucleilor ventro-mediani hipotalamici activează centrul sațietății, iar răciră hipotalamusului la un animal sătul este urmată de ingestia alimentelor.

La om, factorii culturali, de ambianță, experiențele personale trecute, mai ales cele legate de văz, gust și miros, au influență asupra ingerării hranei.

20.9.2. MECANISMUL DE LUNGĂ DURATĂ AL REGLĂRII APORTULUI ALIMENTAR

Efectul net și sumat al tuturor mecanismelor ce reglează comportamentul alimentar la omul normal se reflectă în echilibrul dintre consumul de alimente și cantitatea de energie cheltuită, având ca rezultat menținerea constantă a greutății corporale. Un interes crescând se acordă în ultima vreme leptinei, ca hormon al sațietății (vezi capitolul 14, Hormoni locali).

Nu întodeana această corelație este directă și imediată. Animalele care au câștigat în greutate prin alimeotare forțată vor măsca apoi mai puțin, până ce greutatea le revine la normal.

Animalele supuse inanției își cresc cantitatea de alimente ingerată după încheierea perioadei restrictive, până ce ajung la greutatea corporală normală. În timpul sarcinii și după eforturi, consumul alimentar este crescut. Toate aceste aspecte fac parte din reglarea aportului alimentar de lungă durată, care este în mare parte necunoscută.

Dacă ingestia de glucide este strâns legată de mecanismul de scurtă durată a aportului, mecanismul de lungă durată pare corelat cu ingestia de lipide.

S-a constatat că excesul de acizi grași neesterificați în plasmă scade ingestia de alimente, în timp ce deficitul o crește. S-au evidențiat, de asemenea, liporeceptori hipotalamici sensibili la variațiile nivelului de acizi grași serici, a căror totalitate este cuplată cu funcția principală a nucleului ventro-median de a stabiliza depozitele de grăsimi ale organismului, alcătuind un veritabil mecanism de tip lipostat (ponderostat), ce ar juca un rol principal în reglarea de lungă durată a aportului alimentar.

Depozitele lipidice acumulate în organism determină eliberarea de hormoni tisulari specifici (chalone adipocitare), care inhibă proliferarea celulară. Perturbări ale ponderostatului deplasează balanța greutății corporale, fie spre creștere excesivă (obezitate), fie spre mobilizare excesivă (cașetizare).

Există, de asemenea, dovezi în favoarea existenței unei relații între aminoacizii serici și apetit. Creșterea acestora reduce consumul de glucoză (insă efectul nu este atât de puternic ca al glucozei) și inhibă ingestia de alimente, iar reducerea lor sub valorile normale, din contră, stimulează alimentarea.

Reglarea de lungă durată se realizează prin fenomene lente de aport și consum sau depozitare, în prezent acumulându-se date ce arată că rezervele grase ale organismului sunt sensibile și ele, atât la semnale nervoase cât și umorale plectate din creier. Leptina secretată de adipocitele albe inhibă apetitul și ingestia de alimente, fiind considerată hormonul sațietății. Grelina gastrică și orexina (hipocretina) hipotalamică, dimpotrivă, stimulează apetitul în consumul de alimente.

20.9.3. REGLAREA INGESTIEI DE LICHIDE

Individul normal pierde zilnic 1 900–2 500 cm³ apă, cantitate care este înlocuită printr-un consum corespunzător de lichide. Acest consum este reglat, ca și în cazul ingestiei de alimente, pe cale dublă, nervoasă și umbrală, cu participarea senzației de sete, care se manifestă prin dorința conștientă de a ingera apă.

Senzația de sete se deosebește de cea de foame prin faptul că informația subiectivă de sete dă indicații numai de ordin cantitativ și nu calitativ. De asemenea, setea nu se calmează decât dacă se ingeră lichide, spre deosebire de foame, care se potolește după trecerea orei de masă.

În condițiile privării de lichide, setea devine intensă și se însoțește progresiv de neliniște, teamă și delir.

Rezistența la sete este dependentă de temperatura mediului și suprafața corporală. La suprafețe corporale mai mari, în raport cu greutatea corporală, cum este cazul copiilor mici, rezistența la deshidratare este mai mică și poate prezenta aspecte grave. Balanța hidrică a organismului este reprezentată de raportul dintre eliminarea de apă pe căile: urinară, pulmonară, cutanată și intestinală, pe de o parte, și de înlocuirea acesteia prin ingestie, pe de altă parte. Alături de ingestie mai trebuie adăugată și cantitatea de 300–400 ml/24 de ore de apă provenită din sursă endogenă.

Apariția senzației de sete este determinată de:

- deshidratarea extra- și intracelulară, cauzată de pierderea de lichide și hiperosmoză, în general;
- scăderea debitului cardiac și a masei sanguine, în caz de hemoragie, insuficiență cardiacă acută etc.

Centrul setei se află în hipotalamusul anterior, latero-caudal față de nucleul supraoptic (fig. 20.20). Stimularea cu electricitate a acestei zone determină ingestia de apă sau alte lichide direct proporțional cu timpul de menținere a stimulului.

Leziunile centrului setei determină diminuarea sau abolirea senzației de sete (adipsia) și a consumului de lichide.

Centrii setei se suprapun parțial cu zona din hipotalamus care elaborează ADH, ceea ce face ca excitația acestora să determine și hipersecreția hormonului antidiuretic, mărind reținerea apei în organism de către rinichi.

Stimularea centrului setei se face pe două căi independente, una determinată de hipertonie osmotică a lichidelor organismului și cealaltă, de scăderea volumului lichidelor extracelulare (hipovolemie).

Hipertonie osmotică. Injectarea de soluții hipertone de NaCl în centrul setei produce polidipsie intensă, care poate ajunge chiar până la intoxicația cu apă, ceea ce sugerează existența unor osmoreceptori hipotalamici. Aceștia sunt celule sensibile la creșterea presiunii osmotice a lichidelor organismului și a căror rată crescută de impulsuri va stimula centrul hipotalamic ce inițiază setea și băutul.

Deși există părerea conform căreia consumul de lichide este reglat de osmolaritatea plasmăi în aceeași manieră ca și vasopresina (vezi capitolul Glande endocrine) s-a reușit, totuși, să se obțină prin stimulări diferențiate separarea senzației de sete de reducerea diurezei apoase.

O consecință importantă a hipertoniei lichidului extracelular este deshidratarea intracelulară, care contribuie, de asemenea, fundamental la necesitatea ingerării de lichide, setea de natură hiperosmotică mai fiind denumită și sete intracelulară. Deshidratarea celulară este percepută nu numai de osmoreceptori

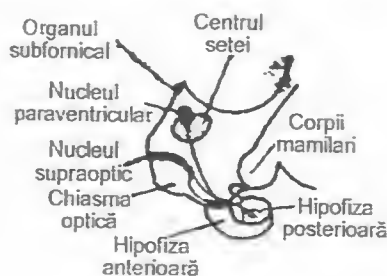


Fig. 20.20. Ariile hipotalamice implicate în reglarea aportului de apă

hipotalamici, ci și de cei de la nivelul mucoasei buco-faringiene, sub formă de uscăciune a gurii, care, obișnuit, este asociată cu senzația de sete. Stimulii buco-faringieni sunt considerați a fi declanșatori ai comportamentului adecvat ingestiei de lichide, participând la acesta prin aferențele glosofaringiene și vagale ce vor activa în final centrul setei.

Centrii hipotalamici primesc informații și de la chemoreceptorii carotidieni, dovadă fiind culegerea de biopotențiale din centrul setei în cazul injectării de soluții hipertone în carotidă.

Hipovolemia. Scăderea volumului de lichid extracelular stimulează centrul setei pe cale independentă de cea care mediază setea ca răspuns la hiperosmolaritatea plasmăi. Astfel, hemoragia determină creșterea consumului de lichide, chiar dacă osmolaritatea plasmăi nu este modificată.

Efectul depleției lichidelor extracelulare asupra setei este mediat de sistemul renină-angiotensină. Acesta face legătura între aportul hidric și controlul renal atât al volumului lichidului extracelular, cât și al reabsorbției de Na⁺, angiotensina fiind cunoscută ca stimuloare a secreției de aldosteron.

Angiotensina II, atât cea endogenă, cât și cea exogenă acționează asupra organului subfornical, ce reprezintă o arie receptoare diencefalică specializată pentru stimularea centrului setei.

Angiotensina acționează, de asemenea, și asupra organum vasculosum al ariei terminale, cu același efect. Ambele zone sunt organe circumventriculare, neurohemale, situate în afara barierei hemato-encefalice și dotate cu o înaltă permeabilitate, datorită prezenței de capilare fenestrate, prin intermediul cărora neurosecrețiile pătrund în circulație.

Legătura dintre organul subfornical și centrul setei este probabil colinergică.

Blocanții angiotensinei nu determină abolirea completă a setei ca răspuns la hipovolemie, ceea ce dovedește că baroreceptorii din cord și vase sunt, de asemenea, implicați.

Echilibrul hidric este dependent, în esență, de excreția urinară și ingestia de apă, având în vedere că pierderea de lichide prin evaporare și materii fecale este mai puțin reglabilă. Marile deficite hidroelectrolitice sunt numai parțial restabilite pe cale renală, ingestia de apă cauzată de sete intervenind ca ultim mecanism compensator.

Senzația de sete dispare în leziunile diencefalice, dar și în stări de alterare a conștienței sau de depresie, în care subiecții își stopează alimentarea cu apă, ceea ce dovedește și implicarea altor factori în comportamentul setei, cum ar fi cei psihologici. Și în aceste cazuri, dacă nu se iau măsuri de restabilire a echilibrului, se ajunge la deshidratare.

O problemă interesantă de control este cea a stopării spontane a ingestiei de lichide la limita necesității.

Unele animale, ca pisica, câinele, cămila, în condiții de deshidratare beau exact cât au nevoie pentru a-și completa deficitul. Oprirea băutului înaintea absorbției, când plasma este încă hipertonică, presupune existența unui sistem de contorizare faringian și/sau gastro-intestinal, pentru care există dovezi că ar fi prezent și la om.

Oprirea băutului se face prin inhibiție reflexă a centrului setei, atât prin stimuli buco-faringo-esofagieni (animalele cu fistulă esofagiană prezintă o dispariție a setei, ce durează 15 minute), cât și prin stimuli gastrici, generați de destinderea stomacului, cu efect de durată mai mare (mecanism dovedit prin experimente cu balon intragastric).

În concluzie, homeostazia hidrică a organismului este menținută datorită intervenției unor mecanisme neuro-umorale complexe, în care stimulul „princeps” al senzației de sete rămâne deshidratarea neuronilor din centrul setei, asociată cu creșterea nivelului de activitate a osmoreceptorilor centrali și periferici, hipotalamusul constituind o zonă de reglare atât a aportului, cât și a eliminărilor lichidiene.

20.10. BAZELE NEUROFIZIOLOGICE ALE DURERII

Durerea este un fenomen perceptiv complex, polimorf și multidimensional, ce asociază manifestări senzitive cu reacții somatice, vegetative, endocrine și psiho-afective de suferință, rezultate din însumarea unor stimuli de natură variată, mediați ascendent prin neurostructuri specifice și nespecifice la niveluri cerebrale diferite, analitice și integrative.

Sensibilitatea dureroasă generează un șir de manifestări individuale ce se constituie într-un act comportamental complex, ca pricten sau dușman al stării de sănătate, în funcție de intensitatea și durata excitantului nociceptiv.

În primul caz, durerea-simptom îndeplinește rolul unui adevărat sistem de alarmă al organismului, care permite acestuia să ia cele mai adecvate măsuri de protecție și îndepărtare a stimulului algogen; în cel de al doilea, durerea poate deveni, prin acutizare sau cronicizare, unul din factorii importanți de solicitare neuro-endocrin-metabolică, mergând până la epuizare și generând alterări tisulare și umorale.

Devenind în final conștientizată, durerea rămâne și azi o manifestare dificil de cuantificat, îndeosebi datorită anteorării unei importante componente afective cu un înalt grad de subiectivitate.

În schimb, reacțiile somatice și vegetative reflexe, ca fenomene cvasiormale isoșitoare și de apărare, au fost obiectivizate cu metode și tehnici din ce în ce mai adecvate.

Substratul material al sensibilității dureroase cuprinde structuri neuroanatomice și factori neurochimici, ce realizează mecanismul de producere, de mediere și de modulare al acesteia la diferite niveluri, atât ascendente, cât și descendente, la care se adaugă influențe educaționale, socio-culturale, motivaționale și mnemice.

20.10.1. TIPURI DE DURERE

Deși greu de clasificat, manifestările percepției dureroase pot fi împărțite anatomo-fiziologic în două categorii principale: durerea primară și durerea secundară.

a) *Durerea primară* este prezentă la suprafața corpului, bine localizată, cu caracter acut și percepere rapidă; apare la 0,1 secunde din momentul aplicării stimulului și durează atât timp cât durează stimulul.

Acest tip de durere este numai de origine tegumentară și se însoțește de un reflex de flexiune ca reacție de apărare. Durerea descrisă apare ca o senzație de înțepătură, este rapidă, ascuțită, fiind determinată de lezarea pielii cu obiecte ascuțite, tăioase sau de acțiunea curentului electric.

b) *Durerea secundară* are caracter lent, cronic și este îndeosebi profundă; posibilitatea de localizare este mai slabă comparativ cu durerea primară, fiind difuză, sub formă de arsură și persistând după încetarea acțiunii stimulului. Ca efect asociat, prezintă o contracție musculară reflexă și apare rar în leziunile pielii, dar frecvent la cele ale țesuturilor profunde (viscere, mușchi, vase de sânge, tendoane, fascii, articulații și periost), cu distribuție nervoasă frecvent pluriradiculară.

Durerea primară (ascută) este condusă prin fibre nervoase A-delta mielinice, în timp ce durerea secundară (lentă) este rezultatul stimulării fibrelor C amielinice.

20.10.2. STRUCTURILE NEUROANATOMICE ALE DURERII

20.10.2.1. Stimuli algogeni, suprafețe receptoare

În drumul său de la excitație nociceptivă la senzație și percepție, sensibilității dureroase i se descriu trei trepte ce sunt parcurse în următoarea ordine:

- suprafața nociceptivă, la nivelul căreia stimulul dureros determină apariția influxului nervos;
- căi și relele sinaptice;
- structuri nervoase centrale de integrare a informațiilor nociceptive și de elaborare a senzației de durere. Reacția organismului la durere este cel puțin triplă: motorie, reflexă vegetativă (tahicardie, hipertensiune, hipotensiune, sudorație) și psihică.

Principalii stimuli algogeni din a căror acțiune multimodală rezultă manifestarea dureroasă sunt mecanici, termici și chimici.

Pentru a produce durerea, aceștia trebuie să aibă o intensitate supraliminară, ci putând acționa separat sau simultan (îndeosebi în durerea patologică).

Stimulii mecanici sunt variați și pot influența suprafața receptoare a organismului prin presiune, vibrație, înțepătură, distensia sau tracțiunea organelor interne etc.

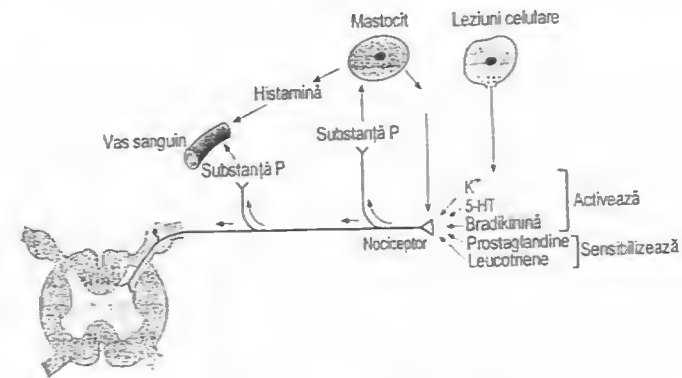


Fig. 20.21. Mediația chimică algogenă periferică.

Stimulii termici determină o senzație dureroasă când temperatura radiată ajunge la 45°, fiind necesară o cantitate de energie calorică de aproximativ 2 000 de ori mai mare decât cea necesară producerii senzației termice obișnuite. Între atingerea pragului dureros și intensitatea maximă suportabilă au fost stabilite 21 de grade, unitatea de măsură fiind dolul (diferența perceptibilă între două grade).

Stimulii chimici nociceptivi sunt reprezentați de unele amine biogene (histamina, serotonina, acetilcolina), de substanțe făcând parte din grupul peptidelor (bradikina, substanța P) și al prostaglandinelor, de ioni H^+ , K^+ , de ioni metalici, de hipoxie (fig. 20.21).

Stimulii chimici intervin îndeosebi în cazul durerii ce însoțește fenomenele inflamatoare tisulare. Unii din stimulii chemonociceptivi pot interveni, în afara rolului lor de producere a durerii, și în medierea acesteia.

Bradikininele eliberate de către lizozomii celulari sunt principalii stimuli chimici algogeni și sunt capabile să scadă pragul de durere atât pentru chemoreceptori, cât și pentru mecanoreceptori, crescând sensibilitatea dureroasă.

Histamina produce o durere de scurtă durată, iar acetilcolina determină senzația dureroasă numai dacă este potențată de histamină.

Substanța P, prostaglandinele și prostacilinele în cantități mici au rol excitator asupra algoreceptorilor, dar, în același timp, sunt și importante substanțe mediatore ale senzației dureroase.

Receptorii pentru durere (algoreceptori sau, în înțeles mai extins, nociceptori) reprezintă segmentul terminal al dendritelor amielinice și mielinice ale neuronilor senzitivi care iau parte la alcătuirea unui nerv cutanat și au un prag de excitabilitate foarte ridicat.

La nivelul pielii și al structurilor profunde, aceste terminații sunt neocapsulate (de tip Merkel și Ruffini), încapsulate (de tip Meissner, Krause și Vater-Pacini) și libere. Terminații algoreceptive se găsesc și la nivelul mușchilor și în pereții viscerelor, prezentându-se sub formă de fibre amielinice arborescente, alcătuind plexuri.

Problema existenței receptorilor algogeni și a fibrelor aferente specifice pentru durere este, încă, controversată. Clasic, se admite că receptorii periferici adecvați induc răspunsuri adecvate pentru tact, temperatură, presiune și durere, aceasta din urmă fiind în mod special corelată cu terminațiile libere. Dificultățile sunt legate de faptul că de la receptorii stimulii nu pleacă izolați, ci sub formă codificată (pachete de potențiale de acțiune), ca apoi, la niveluri ulterioare, să fie decodificați, analizați și integrați ca senzații de diferite tipuri, inclusiv de durere. Pe de altă parte, până la realizarea percepției dureroase, intervin frecvente mecanisme mediatore și modulatori insuficient cunoscute, care, la diferite etape extraneuraxiale și intraneuraxiale, exercită acțiuni modificatoare asupra excitației primare de diferite tipuri.

Clasic, se descriu două tipuri de receptori cutanați pentru durere: algoreceptori mecanici și algoreceptori termici.

Algoreceptori mecanici sunt reprezentați de terminații nervoase amielinice din imediata apropiere a membranei bazale a pielii, fiind stimulați de excitanți de presiune mare.

Algoreceptori termici sau receptori polimodali sunt constituiți tot din terminații ale fibrelor amielinice, care corespund atât la excitanți de presiune puternică, cât și la variații mari de temperatură. Au un câmp receptor mai mic decât al celor mecanici și își cresc sensibilitatea dacă pielea a fost încălzită în prealabil.

Pragul de durere reprezintă, după Beecher (1957), prima senzație dureroasă abia perceptibilă provocată de un stimul minim și pe care un individ prevenit o poate semnaliza verbal. Pragul poate fi cuantificat prin cea mai scăzută intensitate a stimulului care evocă durerea. Variațiile individuale ale pragului sensibilității dureroase sunt mari, de la hiperreactivitate până la indiferentism congenital, fiind unul din criteriile de apreciere a comportamentului față de durere.

În contrast cu capacitatea de adaptare a celor mai mulți receptori senzoriali, receptori sensibili la durere nu se adaptează.

Dimpotrivă chiar, pragul de excitație a fibrelor ce conduc durerea scade progresiv, receptori devenind mai activi în timp, această creștere a sensibilității la durere numindu-se hiperalgie. Lipsa adaptării la durere constituie un important factor de alarmă și protecție, în același timp, față de eventualele lezări ale organismului din cursul acțiunii stimulilor cauzatori de durere.

20.10.2.2. Medierea extranevraxială a durerii

De la receptori periferici la structurile centrale, durerea este mediată prin fibrele mielinizate A-gamma și A-delta, care intranevraxial constituie tractul spino-talamic („tractul durerii”) și, de asemenea, de fibrele de tip C nemielinizate.

Fibrele delta mediază îndeosebi „durerea primară” exclusiv tegumentară, ce are ca prototip senzația bine localizată de înțepătură scurtă, în timp ce fibrele C conduc impulsurile responsabile de apariția durerii „secundare”, intensă și difuză, resimțită atât tegumentar, cât și de structurile profunde.

În cadrul categoriei C s-a descris existența unor fibre care pot fi activate polimodal (mecanic, termic, chimic), ele prezentând și fenomenul de sensibilizare.

Fibrele cu un diametru mai mare decât grupul A-gamma și A-delta (respectiv A-alfa, A-beta) nu ar media durere, ci numai senzații proprioceptive și tactile.

O altă cale extranevraxială de mediere a durerii este cea a rădăcinilor ventrale, care, pe lângă fibrele eferente care inervează musculatura, conține și fibre aferente ce se integrează căilor algoconducătoare. Originea lor se află în fibrele musculare și conduc durerea de tip „mialgic”.

Suprafața tegumentară a organismului este împărțită, din punct de vedere al sensibilității dureroase, în zone relativ bine delimitate, numite dermatome. Fiecărui dermatom îi corespunde un anumit grup de fibre aferente algoconducătoare ce penetrează în coarnele posterioare de-a lungul măduvei pe calea nervilor rahidieni.

Această corespondență este mai bine sistematizată la nivelul trunchiului și mai puțin la nivelul membrilor.

Aferențele care mediază durerea viscerală ca și pe cea din structurile somatice profunde și vase sunt reprezentate de fibre din grupul C, care împrumută calea fibrelor vegetative și pătrund în măduvă odată cu fibrele rădăcinii posterioare prin intermediul ramurii comunicante albe, având protoneuronul în ganglionul spinal.

20.10.2.3. Medierea intranevraxială a durerii

Influsul nervos inițiat de stimulii algogeni este vehiculat de către fibrele A-delta și C la diferite niveluri medulare, trunchi cerebral, etaj mezencefalo-diencefalic, talamic și cortical.

Medierea durerii la nivel medular. Axonii neuronilor senzitivi din ganglionul spinal fac sinapsă cu „neuronii de releu” din structurile 1, 2 și 5 Rexed ale cornului posterior medular.

Neuronii din zona marginală (stratul I Rexed) răspund exclusiv la stimuli nociceptivi. Unii neuroni din această zonă sunt activați numai de stimuli mecanici de intensitate mare vehiculați la fibre A-delta, în timp ce alții sunt activați de stimuli nociceptivi polimodali (mecanici, termici, chimici) conduși de la periferie de fibre A-delta și C. Neuronii excitabili specific nociceptivi există și mai profund în stratul 2 Rexed (fig. 20.22).

În stratul 5 și în vecinătatea sa se găsesc neuroni care sunt activați atât de stimuli nociceptivi care ajung aici pe calea fibrelor A-delta și C, cât și de stimuli tactili vehiculați de fibre A-alfa; tot aici sosesc pe calea fibrelor subțiri și mesaje viscereale. Întrucât spre același neuron din această zonă converg impulsuri cutanate și viscereale, acești neuroni sunt denumiți și „celule convergente” și ar explica „durerea proiectată”.

Axonii neuronilor din straturile 1, 2 și 5 se proiectează la diferite niveluri, alcătuind circuitele morfo-funcționale ale durerii.

Capacitatea de răspuns a acestor neuroni este direct proporțională cu intensitatea stimulilor algogeni (mecanici, termici, chimici).

Căile și ariile de proiecție ale durerii. Fibrele cu origine în neuronii din substanța gelatinoasă Rolando, situați în cea mai mare parte în straturile 1 și 5 Rexed, se încrucișează la nivelul comisurii anterioare și trec în cadranul antero-lateral al substanței albe. Aici se formează calea spino-talamică (neo-spino-talamică) și cea spino-reticulată (paleo-spino-talamică) (fig. 20.23).

Calea spino-talamică se termină în talamus, în cea mai mare parte la nivelul complexului ventro-bazal (nucleul ventro-caudal parvocelular) și, de asemenea, în grupul nuclear posterior (nucleul magnocelular al corpului geniculat medial), nucleul central lateral, nucleul parafascicular și, posibil, în nucleul centrum median, nucleul reticular și nucleul ventro-lateral.

La rândul lui, nucleul ventro-caudal parvocelular proiectează în aria corticală 36 din girusul postcentral, unde iau naștere senzațiile protopatice în care durerea ocupă partea esențială.

Din fasciculul spino-talamic se desprind colaterale care realizează conexiuni cu substanța reticulată a trunchiului cerebral, responsabile de manifestările respiratorii și circulatorii din cursul durerii, și cu nucleii serotonergici ai rafelului, implicați în reacția de trezire și orientare din timpul durerii.

Calea spino-reticulată cu traseu multineuronal, polisaptic, realizează conexiuni cu substanța reticulată bulbară (nucleul magnocelular), pontină și mezencefalică, de la care pleacă importante eferențe în nucleii sistemului de proiecție difuză ai talamusului, îndeosebi în nucleul limitant și nucleii intralaminari. La rândul lor, acești nuclei proiectează în putamen și mai ales pallidum, fiind responsabili de durerea trăită.

La aceste căi se mai adaugă tractul spino-cervico-talamic, reprezentat de axonii altor neuroni din stratul 5 medular Rexed, care ajung în nucleul cervical lateral, după care se încrucișează și proiectează în talamus.

Dovezile experimentale din ultimul deceniu par să demonstreze implicarea în transmiterea durerii și a tractului spino-talamic ventral (cunoscut ca vehiculat de senzații tactile), cu neuroni de origine în straturile 1, 4, 5 și 6 Rexed, proiecția fibrelor algoconducătoare făcându-se în nucleul cuneiform mezencefalic.

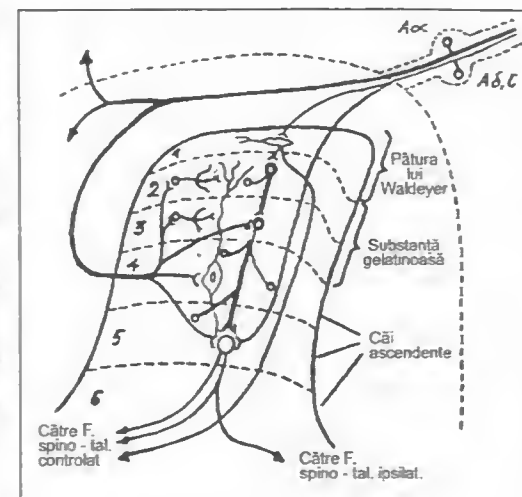


Fig. 20.22. Proiecții aferente primare pe cornul posterior (după Nomo, 1976).

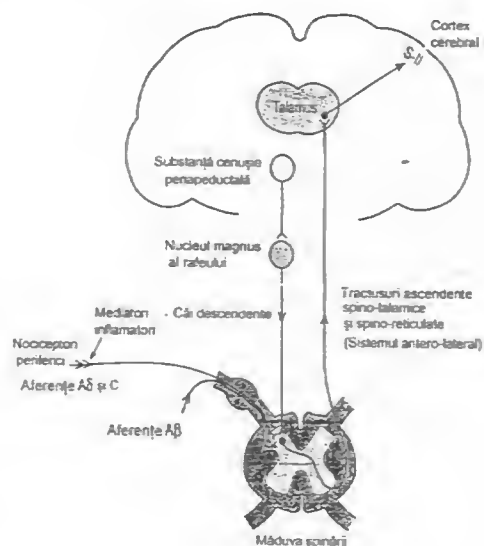


Fig. 20.23. Căile sensibilității dureroase.

20.10.3. MODULAREA DURERII

În prezent este stabilit că asupra mesajelor dureroase ascendente acționează o serie de mecanisme complexe, cu rol în controlul și modularea vehiculării stimulilor nociceptivi.

În acest sens, s-a sugerat ideea că durerea ar putea fi mai degrabă rezultatul pierderilor capacităților modulatorie (îndeosebi inhibitoare), decât al unor procese de stimulare propriu-zisă.

Controlul durerii se exercită încă de la nivel medular, fiind cunoscut faptul că activitatea fibrelor A-alfa (groase) blochează aici transmisia impulsurilor nociceptive vehiculate de fibrele A-delta și C (subțiri).

Dintre teoriile care încearcă să explice acest mecanism se detașează cea a „controlului de poartă”, propusă de Melzack și Wall (1968), care se bazează pe fenomenul de inhibiție presinaptică (*Gate Control Theory*).

Potrivit acestei teorii, la nivelul cornului medular posterior există un mecanism care acționează ca o „poartă” capabilă să permită o creștere sau o scădere a impulsurilor purtate de către rădăcinile dorsale. Astfel, neuronii I din substanța gelatinoasă (SG) ar modula activitatea neuronilor „în T” prin acțiunea inhibitoare asupra acestora (fig. 20.24).

Acțiunea inhibitoare presinaptică a neuronilor I se datorează activării lor prin aferențele A-alfa și A-beta (fibre groase cu conducere rapidă). În cazul în care frecvența impulsurilor crește în aferențele A-delta și C (fibre subțiri și conducere lentă), acestea inhibă neuronii I inhibitori și impulsurile trec, via neuronii „în T”, nefiltrate și „necontrolate”, spre tractul spino-talamic. Datorită acestei facilitări presinaptice cu transmiterea extralemniscă a descărcărilor spre encefal, este favorizată percepția dureroasă.

Excitarea neuronilor I s-ar datorita apariției unui important câmp de depolarizare (negativ) la nivelul substanței Rolando, ce atenuează transmiterea pe influxurile periferice, care, de fapt, sunt și ele unde de depolarizare. Inhibarea neuronilor I apare în momentul invadării lor de către un câmp hiperpolarizant, facilitând excitarea presinaptică.

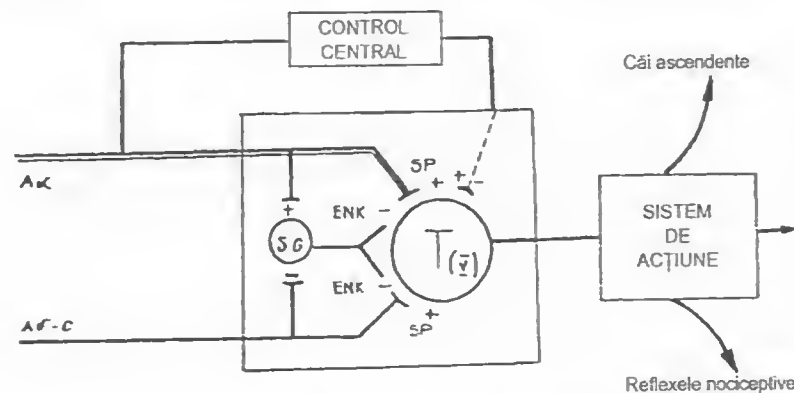


Fig. 20.24. Teoria „controlului de poartă”. ENK, encefalină. SG, substanța gelatinoasă. SP, substanța P. T, neuronul al doilea spinal.

Măduva spinării reprezintă însă doar prima treaptă necesară declanșării reacțiilor reflexe la durere, acțiunea integrativă a acestora fiind realizată în centrii superiori, care îndeplinesc rolul unor veritabile suite de „porți” modulatorie ale impulsurilor nociceptive spino-talamo-corticale (fig. 20.25).

Dintre acestea, formațiunea reticulată a trunchiului cerebral (FRB) ocupă o poziție cheie în procesul de integrare a impulsurilor heterosenzoriale de diferite surse, în vederea facilitării sau inhibiției reacțiilor somatice și vegetative.

Astfel, porțiunea magnocelulară a FRB este una din stațiile importante de releu, cu rol supresor atât asupra mesajelor ascendente spinale nociceptive, cât și asupra centrului median, nucleilor parafascicular și centro-lateral din talamus. O altă parte din fibrele inhibitoare ale nucleului magnocelular ajunge în fasciculul tegmental central din mezencefal.

Alte zone cu acțiune inhibitoare sunt: locus coeruleus din punte, în care își are originea o cale descendentă noradrenergică, cu acțiune inhibitoare postsinaptică; nucleul magnus al rafelui din substanța reticulată mezencefalică, de unde pleacă o cale serotonergică inhibitoare descendentă, la nivel medular, ce realizează conexiuni cu straturile 1, 2 și 3 Rexed, și una ascendentă, la nucleul parafascicular talamic; substanța gri periapeductală mezencefalică și periventriculară, cu acțiune supresivă în special pe stratul 5 Rexed.

La nivel talamic, nucleii parafascicular (NPF), centro-median (NCM) și dorso-median (NDM) sunt profund implicați în integrarea impulsurilor nociceptive.

În timp ce NPF participă la producerea senzației primitive de durere protopatică, NCM asigură modularea, filtrarea și controlul aferențelor nociceptive. În același timp, NDM prin partea sa laterală (parvocelulară) are rol în componenta afectivă a durerii.

În ceea ce privește participarea corticală la fenomenul de durere, se știe că, din cortexul de proiecție temporal (circumvoluțiunea retro-rolandică), calea de conducere a stimulilor nociceptivi se continuă spre lobii frontali, unde se realizează percepția dureroasă complex integrată în personalitatea subiectului.

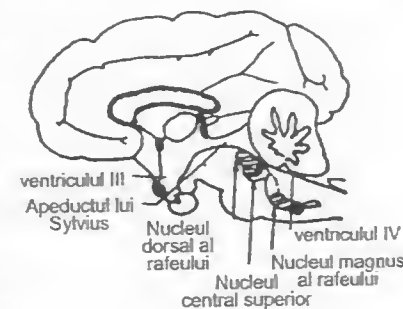


Fig. 20.25. Nucleii subcorticali implicați în durere, a căror stimulare produce analgezie.

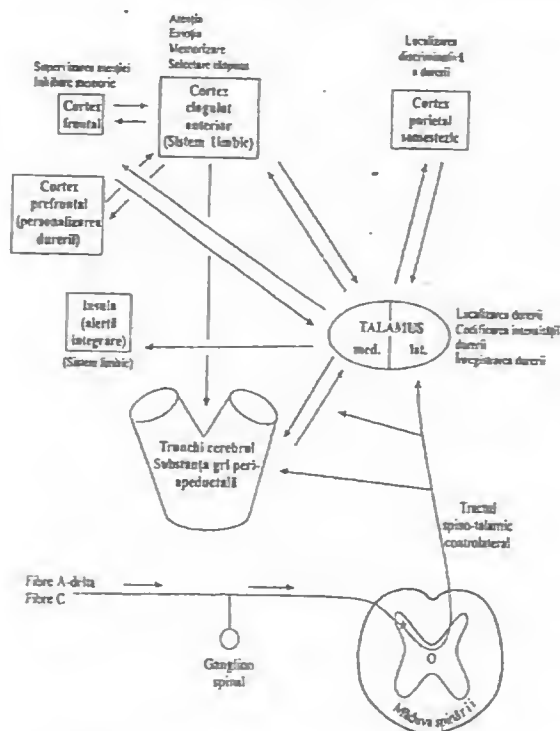


Fig. 20.26. Principalele componente ale rețelei neuromatrixului durerii.

Plecând de la durerea „fantomă” resimțită de subiecții cu mâinile sau picioarele amputate, Melzack (1999) a emis un nou concept asupra controlului nervos central al durerii. Este conceptul de neuromatrix ca sistem determinat genetic de integrare și stocare a informațiilor senzitiv-senzoriale de la nivelul propriului corp (*body-self*) în anumite circuite interneuronale cortico-subcorticeale. Principalele componente anatomice ale rețelei neuromatrixului durerii și semnificația lor funcțională sunt prezentate în fig. 20.26.

Acest substrat integrat genetic presupune o interacțiune dinamică între structurile nervoase cortico-subcorticeale implicate în sensibilitatea senzorială nociceptivă și cea afectiv-emoțională a subiectului, conferind calități și particularități comportamentale specifice percepției lui dureroase.

Această integrare, manifestată mai ales prin capacitatea de evaluare a senzației dureroase și reacția motivațional-afectivă, se realizează prin importante conexiuni cu sistemul paleocortical (rinencefalic) și în strânsă legătură cu hipotalamusul, talamusul și substanța reticulată a trunchiului cerebral.

Schematic, se pot distinge următoarele niveluri fundamentale de integrare, implicate în organizarea complexă a comportamentului la durere:

- trunchiul cerebral, prin substanța reticulată ca sediu al reacțiilor de orientare;
- eșalonul talamo-hipotalamic al durerii, ce asigură antrenarea reacțiilor reflexe generale cu componentele sale somatice (reacția de fugă) și vegetative (modificări vagomotorii și secretorii) ca sediu esențial al reacțiilor de stres;
- rinencefalul, etapă importantă a reacțiilor emotive și memorizatoare;
- neocortexul, indispensabil generării reacțiilor adaptative spațio-temporale.

Donă mențiuni trebuie reținute, și anume: în primul rând, nu există receptori și fibre specifice pentru durere și nici un „centru” al durerii; în al doilea rând, organizarea complexă a comportamentului față de durere nu poate fi redusă la o simplă stratificare de tip jacksonian; dimpotrivă, toate datele converg în a demonstra largi interrelații ale sistemelor modulare.

Rolul sistemelor de motivație ca și acțiunile exercitate de neuro-transmițători sunt numai două ilustrări importante ale acestui punct de vedere.

20.10.4. NEUROCHIMIA DURERII

Transmiterea și percepția durerii implică participarea unui larg grup de substanțe endogene apte atât de stimularea receptorilor algogeni periferici și de realizarea transmiterii senzațiilor la nivelul căilor durerii, cât și de modularea acestei transmiteri mai ales în sens inhibitor.

Așa după cum s-a arătat anterior, receptorii algogeni sunt activați de stimulii mecanici, termici și chimici exogeni (ioni metalici, polipeptide) sau endogeni (bradikina, histamina, serotonina, kaliceina, catecolaminele, ionii de K^+ , Ca^{2+} , H^+ , ATP și unii produși de scindare ai acestuia) atunci când depășesc intensitatea sau concentrația prag.

Una din cele mai tipice dureri în acest sens este cea indusă de hipoxia din cursul ischemiei. Hipoxia locală favorizează acidoza, durerea începând să fie percepută de la un pH de 6,2, atingând un maxim la pH de 3,2. În zona ischemizată se acumulează substanțe endogene cu dublă activitate, vasculară și nervoasă, denumite substanțe vasoneuroactive, din care pe primul plan se situează bradikina, ca produs de scindare al kininogenului plasmatic sub acțiunea kaliceinei.

Permeabilizarea prin hipoxie a membranei elementelor celulare din zonă creează condițiile necesare pentru acumularea locală a ansamblului complex de substanțe enumerate mai sus.

Se pare că toți stimuli, mecanici, termici, chimici, acționează printr-un mecanism similar, diferențele datorându-se doar tipului de substanță algogenă eliberată predominant în condițiile locale date. Aceste substanțe, adevărați hormoni locali, reprezintă inițial un focar important de autoreglare homeostatică locală, dar, când concentrațiile depășesc limita realizării acestui rol, au loc stimularea receptorilor algogeni și apariția durerii.

Un alt grup de substanțe cu rol deosebit de important în neurotransmisia și modularea durerii este reprezentat de opioidele endogene, din care se disting cel puțin două tipuri de peptide: *enkefalinele* și *endorfinele*.

În prezent, pare să se considere stabilită chiar existența a două sisteme neuronale opioide individualizate: sistemul enkefalinergic și endorfinergic.

Neuronii enkefalinergici se găsesc răspândiți la nivelul sistemului nervos central în telencefal (nucleii caudat-putamen, amigdalien, accumbens), diencefal (nucleii paraventricular, supraoptic etc.), mezencefal, formațiunea reticulată, măduvă (straturile 1 și 2 Rexed). Acești neuroni sunt, de obicei, interneuronii ale căror fibre se distribuie pe arii largi, având o densitate deosebită în diencefal, mezencefal (substanța gri periaeductală, formațiunea reticulată, substanța neagră), punte (locus coeruleus, rafeul pontin, formațiunea reticulată), măduvă (substanța gelatinoasă Rolando).

Prezența neuronilor endorfinergici este limitată la nivelul hipotalamusului medio-bazal și al regiunii arcuate, cu terminații în hipotalamusul anterior, substanța gri periaeductală, punte.

Localizarea segmentară a celor două sisteme opioide face să se aprecieze că în sistemele descendente de control al durerii ar exista un etaj inferior, medular, exclusiv enkefalinergic, și un etaj superior diencefalo-mezencefalic, cu mediație endorfin-enkefalinergică.

Endorfinele și enkefalinele endogene sunt apte a produce analgezie, participarea sistemelor opioide în reglarea algocepției profunde și superficiale realizându-se prin intermediul receptorilor de tip miu (μ).

Controlul mediat-inhibitor al durerii este grupat, după cum se apreciază în prezent, în două sisteme, unul ascendent și altul descendent.

Sistemul inhibitor ascendent opioid conține neuroni enkefalinergici și receptori specifici în punctele-cheie de control al durerii („gate-control”): cornul dorsal medular, nucleii rafeului bulbar (median, dorsal, gigantocelular, paragigantocelular), substanța gri periaeductală, substanța nigra, talamus, care exercită efecte blocante asupra percepției durerii în talamus și cortexul cerebral.

Astfel, unul din cele mai cunoscute dispozitive de control tip poartă, desfășurat multietajat de la măduvă la talamus, este cel de la nivelul cornului dorsal, în care se descrie prezența unui interneuron inhibitor encefalinergic și serotoninergic în straturile I, 2 Rexed, activat de aferențe periferice nociceptive (fibre A-beta) sau de către fibre descendente supramedulare cu rol inhibitor asupra durerii.

Acest interneuron odată stimulat determină suprimarea prin inhibiție presinaptică și chiar postsinaptică encefalinergică a potențialelor excitatoare senzitive (SP – reactive de tip A-delta și C nociceptive), care se termină pe neuronii senzitivi din nucleul gelatinos al cornului dorsal (laminele IV și V) (vezi fig. 20.24).

Controlul inhibitor descendent al durerii este reprezentat de sisteme opioide și neopioide.

Sistemul opioid este format din următoarele structuri nervoase: substanța cenușie periaeductală (bulbară și mezecefalică), aria preectală, talamusul medial, nucleul posterior talamic. În zonele menționate s-au pus în evidență numeroși receptori opioizi și importante cantități de encefaline.

Aici se află locul de originea unor fibre descendente cu efect puternic antinociceptiv la nivelul cornului dorsal medular (stratul V). Alte structuri, reprezentând de această dată sistemul neopioid cu rol descendent inhibitor, de asemenea important, se găsesc în formațiunea reticulată a trunchiului cerebral: nucleul rafelei bulbar și mezencefalic, nucleii gigantocelular și paragigantocelular. Din aceste zone pleacă fibre noradrenergice, serotoninergice sau dopaminergice, cu efect antinociceptiv medular.

Trebuie subliniat că ambele sisteme, atât cel opioid, cât și cel neopioid, sunt activate de stimuli ajunși pe calea aferențelor senzitive spino-talamice, cu originea în straturile I, IV, V, și îndeosebi de către aferențele spino-reticulo-diencefalice, ce pleacă din straturile VII și VIII.

De reținut faptul că ar fi greșit să se înțeleagă activitatea acestor sisteme separată și riguros independentă.

Pe de o parte, neuroni opioidergici se găsesc în toate structurile sus-menționate, iar, pe de altă parte, sistemul opioid prezintă și căi indirecte tip bucle de *feed-back* activatoare ale căilor neopioide (o zonă importantă de interferență fiind în acest sens substanța neagră), încât delimitările sunt extrem de dificile și mai mult cu valoare orientativă.

Din punct de vedere al participării opioide la modularea durerii, se conturează nu numai morfologic, ci și neurochimic, existența a două sisteme neuro-umorale antinociceptive; unul difuz, generalizat endorfic, cu participarea endorfinelor hipotalamo-hipofizare eliberate în țesutul cerebral, LCR și plasmă, cu efecte la distanță, și unul localizat, encefalinergic, care presupune asocierea sistemului de control ascendent și descendent antinociceptiv, cu originea principală în substanța cenușie periaeductală și în cornul medular posterior.

Sistemul encefalinergic și îndeosebi cel endorfic ar fi implicate, de asemenea, în analgezia determinată de stresul acut, acupunctură și electroacupunctură, cu variații individuale în funcție de capacitatea de biosinteză și eliberare a opioizilor și a existenței unei anumite densități populaționale de receptori opioid-sensibili.

În modularea nocicepției, în afară de opioizi și substanța P, un loc important îl deține serotonina, mai cu seamă în sistemul descendent inhibitor al durerii, constituit din terminațiile axonice ale neuronilor formațiunii reticulată a trunchiului, ce realizează la nivelul straturilor 5 Rexed blocarea transmiterii ascendente a mesajelor nociceptive.

De altfel, efectul analgetic al morfinei este suprimat dacă se reduce conținutul în serotonină al sistemului nervos central sau se distrug regiunile trunchiului cerebral bogate în neuroni serotoninergici (nucleul magnus al rafelei, substanța cenușie periaeductală).

În ultimul timp, s-au adus dovezi privind participarea în neuromodularea chimică a durerii a unui întreg evantai de amine, aminoacizi, peptide, purine, prostaglandine, cum ar fi: histamina, acetilcolina, GABA, glicina, calcitonina, neurotensina, adeozina, prostaglandina E.

Tabloul medierii și modulării durerii prin acțiunea substanțelor prezentate este departe de a fi complet, fiind deja acumulate cantități impresionabile de date ce atestă participarea a încă multor altor substanțe biologice active (hormoni generali, locali, mediatori etc.) ce realizează, împreună cu cele cunoscute deja, adevărate „axe chimice” care structurează comportamentul complex al subiectului față de durere.

20.10.5. ASPECTE PARTICULARE ALE COMPORTAMENTULUI LA DURERE

În practica medicală, durerea cu origine în diferite viscere toraco-abdominale reprezintă unul din criteriile importante ce stau la baza diagnosticului destul de dificil al bolilor viscerale (mai ales al celor inflamatorii). Există o serie de diferențe care deosebesc durerea somatică de cea viscerală; astfel, lezarea strict localizată la nivelul unei zone dintr-un viscer se însoțește rar de o durere severă, în schimb, orice stimul care determină o excitație difuză a terminațiilor nervoase implicate în durerea viscerală poate determina dureri extrem de severe (de exemplu, ischemia viscerală pe un teritoriu mai întins).

Stimulii cauzatori de durere viscerală pot fi: ischemia țesutului visceral (prin produși intermediari de metabolism ce apar în cantități mari în lipsa oxigenului), unele substanțe chimice ajunse în contact cu viscerele (de exemplu, suc gastric pătruns în spațiul peritoneal printr-un ulcer perforat), spasmul muscular al organelor cavitare (veziculă biliară, uter, intestin) însoțit de dureri ritmice cu durată de câteva minute, distensia bruscă a organelor cavitare ce are drept consecință ischemia tisulară (de exemplu, în ocluzia intestinală). Unele viscere sunt însă insensibile la orice tip de durere, ca de exemplu: parenchimul hepatic, alveolele pulmonare, deși în imediata lor apropiere există zone extrem de reactive la excitația dureroasă, capsula hepatică, canalele biliare, bronhiile, pleura.

Durerea „parietală” cu origine în pereții organelor viscerale cavitare se poate disocia de adevărata durere viscerală. Dacă durerea viscerală are un caracter difuz și surd, cea parietală are caracter de durere primară (resimțită ca înțepătură, arsură, durere ascuțită), chiar dacă stimulul este difuz.

Localizarea durerii viscerale este mai dificilă decât a celei tegumentare, având în vedere gradul mic de conștientizare a însăși existenței organelor viscerale, iar, pe de altă parte, căile diferite de transmitere a durerii viscerale și parietale.

Informațiile viscero-nociceptive sunt transmise prin fibre de tip C aparținând fibrelor senzitive ale sistemului nervos vegetativ simpatic, abordând măduva prin rădăcina posterioară a nervilor spinali odată cu fibrele somatice senzitive. Excepție fac unele căi, puține la număr (din coloana distal, rect, vezică urinară), care pătrund în măduvă prin parasimpatul sacrat, precum și fibre conductoare ale durerii, ce intră în trunchiul cerebral și aparțin unor nervi cranieni (glosafaringianul și vagul, care transmit durerea de la nivelul faringelui, traheei și părții superioare a esofagului).

Nu toți autorii sunt de acord că transmiterea durerii viscerale se realizează prin căi aparținând sistemului vegetativ, apreciind că fibrele algoconductoare viscerale sunt numai alăturate, pe parcursul lor, căilor sistemului autonom.

Durerea parietală cu origine în peretele organelor viscerale cavitare nu este transmisă prin fibre C „lețate” din nervii simpatici, ci prin fibre „rapide” de tip A-delta, de unde și caracterul acestei dureri, asemănător cu cea resimțită la nivelul pielii (durere acută).

Fibrele conductoare ale durerii viscerale pătrund în măduvă odată cu cele somatice, pe calea rădăcinii posterioare a nervului spinal, fac sinapsă cu neuronii viscero-senzitivi din cornul lateral, neuronii substanței reticulată perpendiculare și neuronii somato-senzitivi din cornul posterior.

Această ultimă sinapsă explică durerea „referită” sau „raportată”, adică durerea viscerală percepută la nivelul suprafeței corporale în imediata apropiere a viscerului suferind sau la distanță.

O altă explicație a acestui tip de durere ar fi cea care incriminează proiecțiile viscerale dureroase de la nivelul cortical, ce facilitează filtrarea și recepționarea mesajelor exteroceptive, astfel că excitații cutanate sub pragul dureros ajunse central pot determina senzații nociceptive: există și o ipoteză, neverificată experimental, care consideră durerea referită ca o eroare de interpretare la nivel central, plecând de la existența reală a axonilor bifurcați prin care la nivel integrativ se confundă sursa reală a durerii, proiectarea făcându-se într-o zonă tegumentară heterotipică. Din cauză că fibrele aferente viscerale sunt responsabile de transmiterea durerii referite, localizarea acesteia pe suprafața corpului se face în dermatomele segmentului din care a derivat embriologic orgaanul visceral respectiv. De exemplu, raportarea durerii ischemice cardiace se face în teritoriul cutanat reprezentat de brațul stâng, zona internă a antebrațului și de marginea cubitală a mâinii, durerile veziculei biliare și ficatului în umărul drept etc.

Deși durerea viscerală face parte din categoria durerii secundare, a țăsurilor profunde, ea se diferențiază de aceasta printr-o serie de particularități, cum sunt caracterul referit și hiperalgic al durerii cutanate care o poate însoți, contracția tonică asociată a musculaturii somatice, prezența de efecte vegetative

adăugate (modificarea activității respiratorii, cardiace, paloare, transpirație, vărsături, scăderea presiunii arteriale), precum și o stare emoțională puternică, pe baza căreia se poate realiza chiar monitorizarea experimentală în vederea cuantificării durerii viscerale.

20.10.5.1. Hiperalgeziile și alte sindroame algice

Alterarea pragului de durere poate determina perceperea exagerată a excitațiilor dureroase sau chiar a celor nenocitive ce sunt resimțite sub formă de durere.

Se disting, astfel, hiperalgezii periferice, centrale, viscerale și ale extremității cefalice (faciale și profunde).

Hiperalgeziile periferice apar în anumite cazuri de lezare a nervilor periferici (de tip nevralgic, mialgic). Leziunile de nervi periferici determină, de regulă, deficite motorii, deficite de sensibilitate, tulburări trofice și vegetative. Unele leziuni produc însă și durere, în cazul nevromelor, contuziilor de nervi periferici, meralgiei parestezice, polinevritei, neuropatiei diabetice.

Din categoria hiperalgiilor periferice face parte și cauzalgia, în care durerea cutanată de tip arsură este însoțită de importante tulburări vasomotorii, trofice și psihice, mecanismul fiind încă neclarificat. Ipotezele emise sugerează fie o participare a căilor nervoase simpatice, fie un dezechilibru între fibrele din trunchiul nervului cu viteze de conducere diferite sau prezența unei excitații de tip „stagnat” la nivelul neuronilor intercalari medulari, secundară impulsurilor aferente senzitive.

Hiperalgiile periferice se pot instala, de asemenea, prin lezarea rădăcinilor nervoase sau a plexurilor nervoase. Dintre hiperalgiile de natură centrală un loc important îl ocupă sindromul talamic datorat trombozei ramului postero-lateral al arterei cerebrale posterioare, ce irigă porțiunea postero-ventrală a talamusului, cu lezarea nucleilor talamici: ventral postero-lateral și ventral postero-medial. Printre alte tulburări, în acest sindrom există o hiperpatie a cărei intensitate crește în timp, ajungându-se ca orice tip de sensibilitate să devină dureroasă, cu caracter intolerabil.

Lezarea scoarței cerebrale determină foarte rar dureri. Așa-zisele dureri psihice, descrise în literatură, sunt considerate a fi cenestopatii nevrotice. În unele cazuri de leziuni iritative ale cortexului somestezic pot apărea „paretezii” sau, mai rar, manifestările dureroase pot să îmbrace caracterul unui sindrom pseudotalamic.

Fenomenul de membru fantomă dureros, descris după amputații, se evidențiază prin acuze dureroase continue sau intermitente, localizate spațial în membrul lipsă, însoțite de senzații dezagreabile (crampă, arsură, înțepătură, distorsiune).

În mecanismul producerii acestui tip de durere s-au invocat cauze medulare (activare reverberatorie anormală a unor grupe neuronale din coarnele dorsale și laterale medulare) și/sau cerebrale, determinate în ultimul caz prin erori de integrare corticală a schemei corporale, sau prin reducerea rolului inhibitor al formațiunii reticulate la toate nivelurile simpatice ale sistemului de proiecție somatic, în condițiile reducerii numărului de fibre aferente. Hiperalgeziile extremității cefalice sunt datorate unor structuri intracraniene, creierul fiind, așa cum s-a mai spus, indolor; în schimb, nervii cranieni senzitiv, dăra-mater bazală, marile sinusuri venoase și arterele meningiene sunt foarte dureroase.

Dintre hiperalgeziile superficiale ale extremității cefalice se detașează nevralgia facială primitivă de trigemen, cu caracter atroce, lancinant și paroxistic, declanșată de atingerea unor zone situate pe teritoriul de distribuție a ramurilor trigemenului (*trigger area*), în condițiile lipsei oricărui semn de organicitate lezională a acestui nerv. Dintre multiplele mecanisme propuse a explica acest tip de durere, mai plauzibilă pare cea care pledează pentru o origine nucleară bulbară.

O categorie aparte o constituie hiperalgeziile profunde ale extremităților cefalice, reprezentate de cefalee, migrenă, glosodinii și odontalgii.

Statisticile cele mai autorizate arată că cel puțin 70-75% din oameni au avut sau au dureri de cap de tipuri variate. Cefalgia, cu cele două forme ale ei – paroxistică sau continuă, poate fi o suferință prin ea însăși, dar mai frecvent reprezintă un semn dominant sau asociat într-o mare diversitate de contexte clinice.

20.11. FUNCȚIILE NERVOASE SUPERIOARE

În afara manifestărilor comune senzitivo-senzoriale și motorii obiective, descriibile în termeni fizici, chimici și biologici, emisferile cerebrale umane sunt sediul unor fenomene cognitive, psiho-afective și ideative înalt diferențiate. Acestea sunt reprezentate de memorie, învățare, emotivitate, vorbire, gândire, ideatie etc. Ele au la bază procese neurochimice de decodare, stocare sau prelucrare de informații la nivelul centrilor nervoși superiori, în vederea elaborării reacțiilor conștiente comportamentale, afective sau ideative adecvate. În general, funcțiile nervoase superioare se realizează cu participarea mai multor structuri nervoase cortico-subcorticeale. Conform teoriei holiste actuale, majoritatea funcțiilor înalt diferențiate ale creierului sunt rezultatul activității de ansamblu a țesutului nervos cerebral. Cea mai simplă formă de activitate nervoasă superioară este starea de conștiență.

20.11.1. CONȘTIENȚA

Conștiența este produsul substanței nervoase superior organizate ce constă în integrarea, prelucrarea și interpretarea mesajelor sosite din mediul extern și intern în vederea stabilirii semnificației lor biologice și elaborării de reacții motorii, psiho-emoționale sau ideative orientate. Ca formă particulară a stării de veghe, conștiența reprezintă cea mai înaltă formă de reflectare subiectivă a lumii obiective și a propriei persoane.

20.11.1.1. Baze anatomo-fiziologice

La realizarea și întreținerea stării de conștiență participă atât pulsurile dinamogene ale formațiunii reticulate activatoare mezencefalo-diencefalice, cât și hipotalamusul, sistemul talamic nespecific și scoarța cerebrală, ca centri coordonatori ai activității comportamentale conștiente și vieții emoționale.

Formațiunea reticulată activatoare ascendentă asigură, prin conducerea difuză și nespecifică reticulo-corticală, reacția de trezire și menținerea stării de veghe, fără de care perceperea informațiilor senzitivo-senzoriale și răspunsurile adecvate la mediu nu sunt posibile.

La rândul ei, activitatea formațiunii reticulate mezencefalo-diencefalice ascendente se realizează fie printr-un mecanism de autoîntreținere a propriului său tonus, cu ajutorul factorilor intrinseci umorali, fie prin colaterale nespecifice ale diferitelor căi senzitivo-senzoriale. La acestea se adaugă impulsurile ionogene venite de la scoarța cerebrală pe calea circuitului reverberant activator cortico-reticulo-cortical. Trezirea și menținerea stării de veghe este, astfel, rezultatul sinergiei funcționale realizate între formațiunea reticulată și scoarța cerebrală.

La procesul de activare corticală de către formațiunea reticulată participă două sisteme de trezire: unul adrenergic, cu sediu mezencefalic, și altul colinergic, care ocupă talamusul difuz, nespecific. Acționând asupra primului sistem, substanțele inhibitoare ale sistemului adrenergic, de tipul clorpromazinei, produc sincronizare corticală și somnolență.

Sistemul talamic cu proiecție difuză este reprezentat de nucleii și conexiunile intratalamice care acționează nespecific și mai limitat decât formațiunea reticulată ascendentă asupra scoarței cerebrale. Ca și formațiunea reticulată, sistemul talamic nespecific este format din două componente, una sincronizatoare hipnogenă și alta producătoare de reacții desincronizante, de trezire.

Hipotalamusul posterior, făcând parte din formațiunea reticulată diencefalică, participă la întreținerea stărilor de veghe și conștiență, atât prin fenomenele de predominanță simpatică, cât și prin descărcările hormonale hipotalamo-hipofizare. Împreună cu formațiunea reticulată mezencefalică și nucleii talamici nespecifici, hipotalamusul posterior constituie ansamblul de formațiuni nervoase subcorticeale denumit de Penfield (1951) sistem centrencefalic. Acesta ar fi, după autorul sus-citat, sediul proceselor de vigilență și conștiență. În sprijinul unui asemenea punct de vedere vin atât dispariția stării de conștiență după distrugerea formațiunilor subcorticeale menționate, cât și conservarea acestora la animalele decorticate.

La nm, scoaterea din funcțiune a scoarței cerebrale este incompatibilă cu păstrarea stării de veghe. Așadar, nu numai formațiunea reticulată mezencefalo-diencefalică cu componentele sale talamice și hipotalamice constituie substratul anatomic al conștienței, ci și scoarța cerebrală. Pe fundalul stării de veghe realizat de formațiunea reticulată activare ascendentă se grefează procesele de stocare, integrare gnnzică și perceperea conștientă a mesajelor sosite din mediul înconjurător și propriul organism.

Decodarea și conștientizarea unei anumite informații ajunse la centrul nervos superior pe diverse căi senzitivo-senzoriale poartă numele de **senzație**. În funcție de natura excitantului și particularitățile senzitiv-senzoriale ale neuronilor din zonele de proiecție corticală, senzațiile pot fi termice, tactile, vibrații, dureroase, auditive, luminoase, olfactive, gustative etc. Caracteristicile de bază, comune tuturor senzațiilor, sunt spațialitatea, temporalitatea, calitatea și intensitatea.

Spațialitatea privește recunoașterea locului de aplicare a excitantului producător de senzație.

Temporalitatea se referă la apariția și durata senzației respective.

Calitatea, sau **modalitatea**, este criteriul după care senzațiile sunt distinse în funcție de informațiile primite de la diverși senzori, începând cu cele cinci organe de simț clasice (văz, auz, tactil, miros și gust) și sfârșind cu zonele receptoare termoașezice, extero-, proprio- și interoceptive.

În sfârșit, **intensitatea**, sau **cantitatea**, este caracteristica de bază care determină amplitudinea sau frecvența potențialelor de receptor și descărcările potențialelor de acțiune ale nervilor senzitivo-senzoriali la nivelul centrilor de integrare și elaborare a senzațiilor respective.

Spre deosebire de senzație, care reflectă o însușire a unui obiect sau fenomen oarecare, percepția este procesul nervos de reflectare a ansamblului pe baza experienței anterioare rezultate din acțiunea nemijlocită a acestora.

Percepția rezultă din tratamentul particular al informației senzoriale conștientizate, făcând obiectul atenției, interpretării și memorizării. Realizarea percepției în absența mesajului senzorial din timpul halucinației demonstrează că aceasta are o existență proprie, distinctă de senzație.

Integrarea informațiilor și compararea lor pe baza experienței anterioare asigură trecerea la etapa următoare a cunoașterii, **reprezentarea**. Spre deosebire de senzație și percepție, reprezentarea are la bază procese neuro-psihice de reflectare și realizare a imaginilor senzitivo-senzoriale, evocate mental în absența obiectelor sau fenomenelor care le-au produs. Reprezentarea, ca formă de „abstractizare” senzorială, deține un loc important în trecerea de la prima treaptă a cunoașterii, bazată pe senzații și percepție, la cea de-a doua treaptă, reprezentată de gândirea abstractă. Reproducând imaginea unor obiecte sau fenomene pe care le-am văzut anterior, reprezentările intervin în procesele de memorare, învățare și gândire creatoare.

20.11.2. MEMORIA

Memoria constă în capacitatea creierului de fixare, conservare, recunoaștere și evocare a unor informații și experiențe anterior acumulate. Ca bază a proceselor de cunoaștere, învățare și adaptare a comportamentului la condițiile impuse de mediu, memoria asigură reținerea unui foarte mic număr din informațiile sosite la nivelul centrilor nervos superiori. Selectarea și engramarea informațiilor depind de semnificația acestora, de atenție și de capacitatea de stocare a creierului uman. Aceasta a fost evaluată la aproximativ 3×10^6 biți. În condiții bazale de conștientă, cuantumul de informații din întregul sistem senzitivo-senzorial ajunse la creier nu depășește 50 biți/s. În timpul cititului liniștit acționează cam 40 biți/s, iar în calculul mental doar 12 biți/s. Selecția și uitarea protejează creierul de acumularea informațiilor inutile.

În general, memoria este de două feluri, **innăscută** și **câștigată**. Spre deosebire de memoria **innăscută**, care, fiind transmisă genetic, este imuabilă, memoria **câștigată** se dobândește prin experiență și se transformă continuu.

La rândul lor, procesele de memorare dobândită cuprind mai multe etape: engramarea informațiilor sosite pe diverse căi la centrul nervos superior, ștergerea sau conservarea și extragerea lor, ce se realizează prin evocare sau recunoaștere. Datorită capacității de selectare și reținere mai întâi a conceptelor și apoi a detaliilor, creierul uman se deosebește din punct de vedere operațional de benzile magnetice sau băncile electronice de date care stochează toate informațiile primite. Pe de altă parte, capacitatea de a realiza concepte sau idei și a le stoca sub forma lor abstractă diferențiază memoria umană de cea care operează în regnul animal.

20.11.2.1. Tipuri de memorie

Evaluându-se durata și procentajul de informații recunoscute și evocate după ce au fost memorate, inițial s-au pus în evidență două tipuri de memorie: una fragilă, instabilă și vulnerabilă, denumită **memorie primară**, sau de scurtă durată, și alta stabilă și persistentă, denumită **memorie secundară**, sau de lungă durată. Ulterior, s-a constatat că problema memorizării este mult mai complexă atât din punct de vedere secvențial, cât și sub aspectul bazelor sale neurofiziologice. La rândul ei, memoria de lungă durată se subdivide în următoarele componente (fig. 20.27). Spre deosebire de memoria explicită (declarativă) care poate fi apelată deliberat în urma prelucrării cognitive a informațiilor în hipocamp, cortexul prefrontal și asociativ, memoria implicită (nedeclarativă) integrează informațiile legate de aptitudinile motorii și perceptuale în jurul centrilor reflexi, acționând automat și inconștient prin mecanisme cortico-subcortico-spinale complexe. În prezent, se descriu trei sau chiar patru tipuri de memorie, în funcție de secvența și durata proceselor psiho-fiziologice produse de informația verbală sau neverbală codificată la nivelul centrilor nervos superiori. Într-un prim moment are loc procesul de **memorare senzorială**, produs de informația plecată de la receptor și preluată de aria corticală în vederea evaluării, prelucrării și stocării sau uitării sale. Durata acestui proces automat și limitat la aria de proiecție corticală este foarte scurtă, de câteva sute de milisecunde. Transferul informației în zonele corticale conectate morfo-funcțional cu aria de proiecție primară duce la codarea verbală sau neverbală a acesteia, inițiind trecerea la etapa următoare a memorării, reprezentată de **memoria de scurtă durată**, sau **primară**. Aceasta este memoria faptelor, cuvintelor, numerelor, literelor sau altor informații recente, engramate pentru scurt timp și uitate odată cu apariția unor noi informații. Durata reținerii informației respective variază de la câteva secunde, la câteva minute, iar cuantumul de informații stocate este limitat la un număr redus de biți. Noile informații le dislocă pe cele anterioare, ducând la uitarea lor. La om, memoria primară lingvistică asigură reținerea și evocarea imediată doar a ultimelor cuvinte enunțate. Acest fenomen, cunoscut sub numele de **efectul memorial de proximitate**, este caracteristic memoriei de scurtă durată. Eficiența memoriei primare scade dacă imediat după preluarea informației apar elemente de distragere a atenției printr-un alt proces mental sau dacă se alungește intervalul între stocarea și evocarea acesteia. Fixarea mnezică a informației depinde de timpul de circulație a acesteia la nivelul circuitelor reverberante talamo-corticele. Consolidarea ei este asigurată prin repetare, facilitând trecerea la memoria secundară, sau de lungă durată.

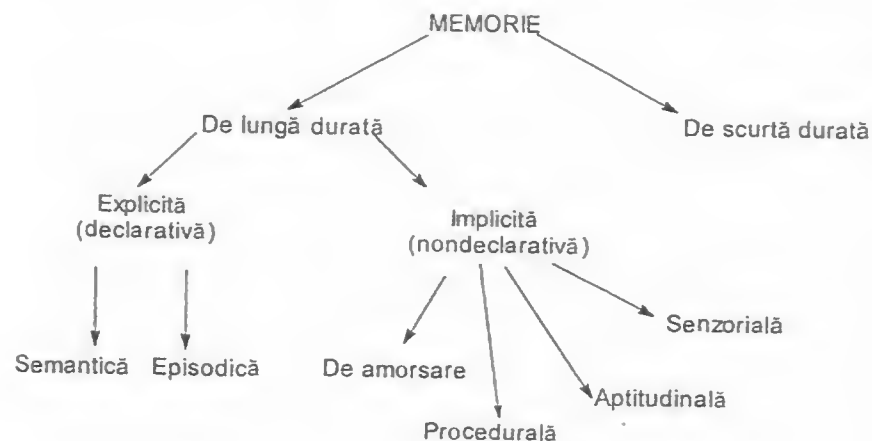


Fig. 20.27. Clasificarea componentelor memoriei de lungă durată.

Memoria de lungă durată privește stocarea tuturor tipurilor de informații care pot fi reamintite după ore, zile, luni sau ani de la engramarea lor. Caracteristic acestui tip de memorie este fixarea informației în funcție de semnificația acesteia și recunoașterea ei lentă, după un timp de căutare (secunde sau minute) prin numărul mare de informații stocate. Capacitatea de stocare apare practic nelimitată, grație reorganizării continue a memoriei preexistente. Uitarea se datorește, în cazul memoriei de lungă durată, interferențelor cu procesele de învățare realizate anterior sau ulterior memorizării. În primul caz este vorba de o inhibiție proactivă, iar în cel de-al doilea, de inhibiție retroactivă. Natura memoriei de lungă durată este diferită de aceea de scurtă durată, întrucât electroșocul sau anestezia profundă nu este urmată de pierderea faptelor memorate, așa cum se întâmplă în cazul memoriei de scurtă durată. După unii autori (Schmidt și Thews, 1983), memoria de lungă durată privește nu numai memoria secundară cu durată variabilă, ci și memoria permanentă, denumită și terțiară (fig. 20.28).

Memoria terțiară se referă la engramările care privesc propriul nume, cititul, scrisul și alte acte zilnice, care nu se uită, chiar în cazurile de alterare a celorlalte forme de memorare. Spre deosebire de memoria secundară, accesul la informația stocată este rapid în acest caz, iar uitarea nu apare decât excepțional, datorită practicii zilnice.

Pierderea parțială sau totală a memoriei poartă numele de *amnezie*. Aceasta poate fi anterogradă și retrogradă. Amnezia anterogradă privește faptele trăite după evenimentul cauzator al pierderii memoriei. Ea se întâlnește adeseori la alcoolicii cronici sau în leziunile hipocampice și se caracterizează prin pierderea memoriei recente și incapacitatea transferului de informații de la memoria primară la cea secundară.

Amnezia retrogradă constă în uitarea informațiilor stocate înainte de evenimentul care a produs amnezia respectivă. Este cazul amneziilor provocate de șocurile de diferite cauze (mecanice, electrice, apoplectice, anestezice etc.).

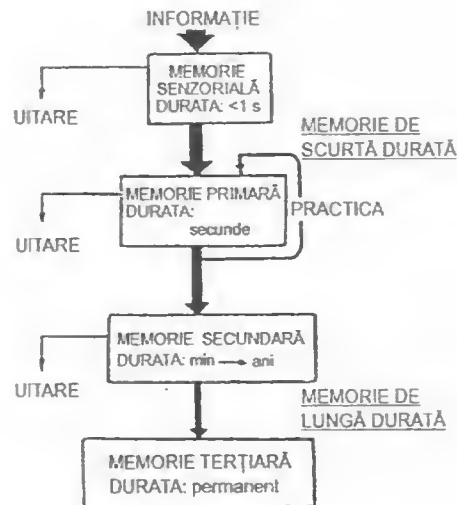


Fig. 20.28. Schema proceselor de memorare.

20.11.2.2. Localizarea proceselor nervoase de memorare

Localizarea proceselor nervoase de memorare este greu de stabilit cu rigoarea necesară, deoarece la producerea lor participă numeroase structuri cortico-subcorticeale. Dacă în cazul memoriei de scurtă durată este indispensabilă integritatea morfo-funcțională a zonelor senzoriale primare, în cazul memoriei de lungă durată este vorba de participarea mai multor arii corticale. Un rol important revine proceselor neurochimice de la nivelul lobului frontal. Cortexul frontal, primind numeroase aferențe de la nucleii talamici nespecifici, hipocamp, amigdală, girusul cingulat și hipotalamus, reprezintă partea neocorticală a sistemului limbic implicată în comportament și învățare. Leziunile clinice sau experimentale practicate la nivelul lobului frontal de asociație se însoțesc frecvent de perturbări atât ale memoriei recente, cât și ale manifestărilor emoționale, de tipul impulsivității și iritabilității exagerate. Lobotomia frontală la om este urmată de scăderea capacității de memorizare, a emotivității și motivației. La rândul lor, lobii temporali sunt depozitarii unui mare număr de informații, engramate mai mult în lobul stâng, decât în cel drept. Stimularea electrică a zonei temporale posterioare determină perturbarea evocării unor fapte din trecutul îndepărtat. Excitarea părții anterioare a lobului temporal alterează capacitatea de fixare în memorie a amintirilor. Regiunea hipocampică este importantă mai ales pentru stocajul informațiilor recente și transferul acestora în memoria de lungă durată. Capacitatea de memorizare apare alterată și în cazul leziunilor de lob parietal.

Stimularea cortexului temporo-parietal stâng perturbă evocarea verbală, respectiv extragerea din memorie a informațiilor stocate, realizând o adevărată amnezie retrogradă. Faptul este explicabil dacă se are în vedere prezența la acest nivel a ariei asociative Wernicke, ca principal mediu al activității intelectuale. În ceea ce privește memoria vizuală, aceasta depinde în primul rând de aria gnozie din lobul occipital (aria 18). Studiul cazurilor cu leziuni occipitale a permis localizarea diferită pentru memoria obiectelor animate și neanimate, precum și pierderea capacității de revizualizare și visare. Totodată, s-a precizat existența unei interacțiuni temporo-occipito-mezencefalo-diencefalice, cu rol în integrarea memoriei în timp și spațiu.

Dintre structurile subcorticeale, corpul calos și comisura anterioară participă la transferul și stocarea difuză în emisferele cerebrale a memoriei de lungă durată. La rândul lor, nucleii talamici mediani dirijează informațiile verbale mai mult spre emisferul stâng și pe cele neverbale în emisferul drept. Stimularea nucleului pulvinar stâng provoacă pierderea retrogradă a memoriei recente verbale, în timp ce aceeași stimulare practică în partea dreaptă nu influențează memoria verbală, dar împiedică recunoașterea figurilor.

Pe de altă parte, lezarea corpurilor mamilari din hipotalamusul posterior determină pierderea capacității de memorare a informațiilor noi, ca în cazul sindromului Korsakov uman (caracterizat prin amnezia anterogradă). De menționat că hipotalamusul posterior intervine în procesele de memorare și, prin rolul său, în menținerea stării de veghe. Aceasta presupune integritatea formațiunii reticulate, a cărei alterare poate duce la amnezia totală. Unii autori (Glickman, 1961) susțin că hipocampusul și amigdala participă la procesele de memorizare prin intermediul formațiunii reticulate și al circuitului cortico-subcortical reprezentat de bucla Papez, rinencefalo-diencefalică. Hipocampusul, amigdala și sistemul limbic, în general, realizează nu numai filtrarea și stocarea informațiilor, ci asigură și suportul vieții emoționale. Pe această cale, stările psihice influențează procesele de memorare. Se știe că informațiile cu suport afectiv pozitiv se rețin mult mai ușor decât altele.

20.11.2.3. Bazele fiziologice ale memoriei

Mecanismul de producere al proceselor de memorare este insuficient cunoscut.

În cazul *memoriei primare*, s-au emis mai multe teorii care pun engramarea și stocarea de scurtă durată a informației fie pe seama circuitelor reverberante locale, fie a potențării posttetanice.

Teoria circuitelor reverberante are la bază faptul că aria corticală stimulată continuă să emită potențiale de acțiune ritmice și după întreruperea excitantului pentru o scurtă perioadă de timp. Odată cu instalarea fenomenului de oboseală, la nivelul circuitului cortical local sau cortico-subcortical respectiv, memoria primară dispăre. Același lucru pot realiza semnalele care interferează cu circuitul reverberant, cum sunt traumatismele craniene producătoare de stări comatoase, șocul electric și anestezia. Acestea alterează evocarea informațiilor recent engramate.

20.11.3.1. Modalități de învățare

În general, învățarea este de două feluri: asociativă și neasociativă. În timp ce învățarea asociativă necesită stabilirea unor relații predictive între stimuli, cea neasociativă se realizează fără intervenția unor asemenea relații. Ambele se bazează pe repetare și experiență.

Învățarea neasociativă. Cea mai simplă formă de învățare neasociativă este habituarea (obișnuită), denumită și învățarea negativă. În esență, este vorba de scăderea progresivă a amplitudinii răspunsului după aplicarea repetată a aceluiași stimul. Ca exemplu poate fi dat reflexul de orientare produs de un stimul sonor, care se atenuează până la stingere dacă nu este însoțit de un eveniment asociat stimulului respectiv.

O altă formă de învățare neasociativă o reprezintă facilitarea, sau sensibilizarea. Aceasta constă în creșterea răspunsului comportamental sau neuro-psihic, rezultată din asocierea unui stimul nociv cu unul neutru. Dacă la un câine sau o pisică se asociază un stimul sonor cu altul dureros, stimularea sonoră ulterioară va determina reacții mai intense decât cele inițiale.

Învățarea asociativă. La rândul său, învățarea asociativă se poate realiza fie prin condiționare reflexă clasică, fie prin condiționare operantă sau instrumentală. Bazele învățării asociative au fost puse cu ajutorul reflexelor condiționate descrise de Pavlov. Acestea sunt grefate pe fondul reflexelor innăscute, necondiționate.

Reflexele condiționate se formează prin asocierea unui excitant necondiționat cu unul la început indiferent. Excitantul indiferent devine condiționat prin repetarea asocierii. Termenul de indiferent se referă la reacția necondiționată și nu la valoarea sa absolută. Asocierea unui excitant necondiționat cu un stimul indiferent sau condiționat determină stabilirea de conexiuni interneuronale noi după un număr variabil de stimulări cuplate, urmate de apariția reacției reflexe la aplicarea numai a excitantului condiționat. Exemplul clasic este reflexul condiționat salivar demonstrat de Pavlov la câini cu fistulă salivară. Stimulii condiționați auditivi sau vizuali indiferenți, asociați cu excitantul absolut (hrana), provoacă salivarea reflex condiționată după un număr de asocieri, ca urmare a conexiunilor temporare funcționale create între centrul salivar subcortical și aria corticală stimulată concomitent de către excitantul condiționat (fig. 20.30).

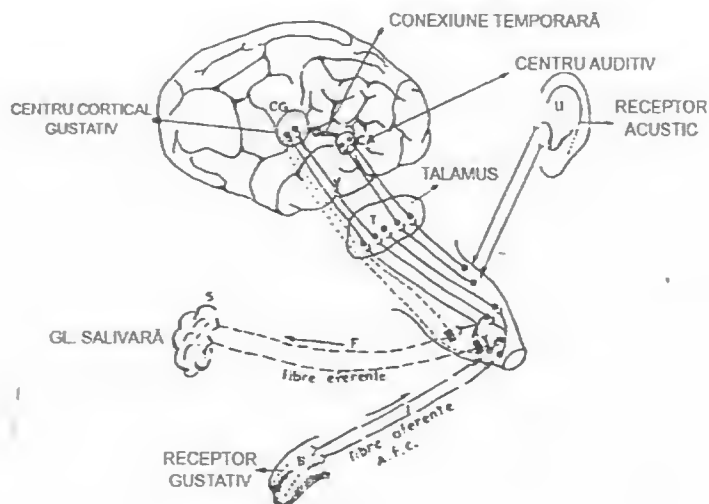


Fig. 20.30. Schema simplificată a mecanismului de elaborare a reflexului condiționat salivar.

Prin procese neurofiziologice similare de condiționare și transfer al semnificației semnalelor se realizează comportamentul responsiv și învățarea la om. Reflexele condiționate se formează în decursul existenței, însumând experiența individuală și cunoștințele acumulate. Determinând reacții comportamentale adecvate la situații care se repetă, ele îmbunătățesc continuu funcția de adaptare a organismului la condițiile variabile ale mediului extern sau intern. Pentru ca învățarea prin condiționare să se realizeze în condiții optime, este necesar ca între stimulul necondiționat (absolut) și cel indiferent (condiționat) să existe anumite raporturi de timp. Astfel, stimulul condiționat trebuie să precedă cu puțin pe cel absolut, iar intensitatea lui să fie adecvată. Un șoc electric puternic, de exemplu, nu va putea deveni excitant condiționat salivar, întrucât provoacă reacții inverse, de inhibare a salivăției. Odată realizat, reflexul condiționat trebuie întărit din timp în timp cu excitantul necondiționat (absolut), pentru a se evita fenomenul de stingere a reflexului respectiv.

Din punct de vedere anatomo-fiziologic, condiționarea clasică include cel puțin trei categorii de neuroni:

- a) neuroni aparținând căii aferente senzoriale necondiționate;
- b) neuroni aferenți stimulați de excitantul condiționat;
- c) neuroni aferenți care inițiază și realizează răspunsul reflex.

La aceștia se adaugă neuronii căii aferente nespecifice din formațiunea reticulată, precum și neuronii de asociație care realizează conexiunile temporare caracteristice condiționării reflexe. La baza legăturii funcționale nou-create stau modificări neurochimice și plastice ale sinapselor interneuronale de tipul celor din memoria de lungă durată (creșterea și înmulțirea prelungirilor dendritice și axonale, umflarea butonilor terminali, îngustarea fantei sinaptice). Problema elaborării reflexelor condiționate este, desigur, mult mai complexă, un rol important revenind circuitelor reverberante cortico-subcortice, la care participă formațiunea reticulată mezencefalică, structurile limbice și nucleii talamici, alături de scoarța cerebrală, ca principal loc de integrare și elaborare a reacției reflexe condiționate.

Studiul modificării EEG și al potențialelor evocate din timpul condiționării a evidențiat fenomenul de activare difuză electroencefalografică și răspunsuri evocate în diferite arii corticale. Condiționarea electrocorticală, evidențiată de blocarea undelor alfa (reflex condiționat de alfa-blocare), este împiedicat prin lezarea nucleilor talamici cu proiecție difuză, sugerând sediul talamic al condiționării reflexe. Unii autori (Gastaut) atribuie formațiunii reticulate rolul de a forma conexiuni temporare prin condiționare, întrucât atât stimulii necondiționați, cât și cei indiferenți ajung la scoarța cerebrală și pe calea nespecifică a formațiunii reticulate. Distrugerea sau blocarea acestora suprimă reacțiile reflex-condiționate.

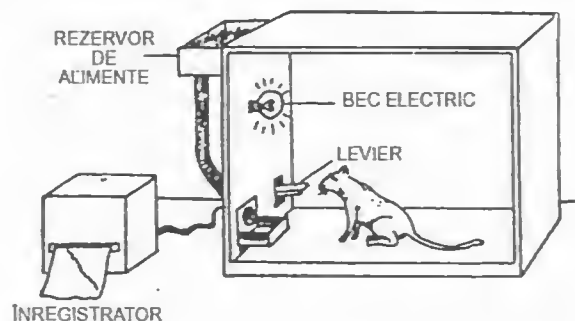
Spre deosebire de excitantul absolut, care este specific, stimulul condiționat poate deveni orice agent capabil să excite structurile cortico-subcortice, prin intermediul unui receptor oarecare. Acesta poate fi de natură senzitivo-senzorială sau abstractă, cum este cazul timpului înregistrat datorită fenomenelor ciclice din organism. Dacă se alimentează în mod repetat un câine și i se suprimă la un moment dat alimentarea, acesta va prezenta reacție reflexă la timpul corespunzător, datorită formării de legături condiționate la timp. În general, reflexul condiționat nu este o copie fidelă a celui necondiționat, iar stimulul condiționat nu se poate substitui complet celui necondiționat în declanșarea reflexului.

Din punctul de vedere al teoriei informației, se admite că, în timp ce excitantul necondiționat duce de la început cantitatea mare de informații la centrul reflecției superiori, stimulul condiționat inițial nu oferă încă o informație și numai prin asociere repetată cu cel necondiționat capătă valoare informațională, ca urmare a transferului de informații de la excitantul necondiționat.

Răspunsul obținut este rezultatul interacțiunii mesajului transmis spre cortex, prin sistemele senzitivo-senzoriale specifice, cu experiența anterioară, în vederea stabilirii semnificației celei prezente și elaborării mesajului eferent. În timp ce reflexul necondiționat funcționează ca un servomecanism cu structură constantă, reflexul condiționat are la bază conexiunea temporară creată de asocierea repetată a doi sau mai mulți excitanți ajunși la centrul reflex pe căi diferite. Prin repetare cuplată, stimulul indiferent devine semnificativ și determinant al răspunsului condiționat.

Învățarea prin condiționare clasică, astfel realizată, se desfășoară în trei etape. Prima etapă, preliminară, privește modificarea atenției produse de apariția excitantului neutru sau indiferent. În cea de-a doua etapă are loc transformarea acestuia în stimul semnificativ (condiționat), la nivelul structurilor nervoase declanșatoare ale reflexului necondiționat, ca urmare a asocierii și receptării excitantului absolut cu cel indiferent. Etapa a treia constă în procesul de învățare propriu-zisă a răspunsului neuro-efector la acțiunea excitantului condiționat, fără participarea stimulului absolut.

Fig. 20.31. Reflex condiționat instrumental.



Spre deosebire de condiționarea de tip clasic, generatoare de răspunsuri reflexe involuntare, condiționarea instrumentală se realizează voluntar sau accidental.

Condiționarea instrumentală stă la baza comportamentului operant descris de Skinner (1935). Caracteristica acestui tip de învățare este apariția răspunsului declanșat de subiectul însuși, fără compoentă reflexă necondiționată determinată de stimulii externi. Deși reacțiile pot fi influențate de situații sau factori ai mediului ambiant, ele sunt întărite de diferite modalități de recompensă care le urmează. Întărirea poate fi pozitivă (plăcere, hrană, încuviințare, bani etc.) sau negativă (durere, pedeapsă, ofensă sau jignire), ca urmare a modificării răspunsului reflex de către propriul său efect. Scăderea intensității reflexului condiționat sau instrumental determinată de repetarea stimulului poartă numele de habituație (adaptare graduală).

Evenimentele care produc întărire sunt primare, secundare și generalizate. Întărirea primară satisfac nevoi biologice, cum sunt hrana sau îndepărtarea de durere. Întărirea secundară are la bază o întărire primară care, prin condiționare, a căpătat valoare de întărire proprie.

Ca exemplu poate fi dat suetul unui clopoțel ce anunță masa unei persoane informate. La rândul lor, întărirea generalizată are la bază evenimente asociate în trecut cu mai multe tipuri de întărire primară sau secundară, cum ar fi banii, un gest de aprobare sau încuviințare etc. Orice răspuns urmat de o astfel de întărire va fi în mod repetat memorat și învățat. Reîntărirea produsă de orice eveniment pozitiv sau negativ va contribui la consolidarea memorării și învățării.

Condiționarea instrumentală sau operantă a fost demonstrată experimental de către Skinner (1935) la șobolani. Folosind o cușcă prevăzută cu un mic levier și un distribuitor de hrană declanșat prin intermediul levierului respectiv, acesta a observat că apăsarea, pe levier, urmată de eliberarea hranei constituie pentru șobolan recompensa actului motor ce va fi repetat ori de câte ori îi va fi foame. Actul motor de apăsare pe levier produs de foame devine reflex condiționat operant, pentru că el efectuează operația care procură recompensa.

Fenomene similare au loc în cazul unei pisici flămânde, plasată într-o cușcă prin care se vede hrana situată în afară (fig. 20.31). Dacă în interiorul cuștii există un levier pentru deschiderea ușii, pisica agitată va acționa pe dispozitivul respectiv, în cursul activității sale de explorare, în vederea obținerii hranei. Deschiderea ușii constituie pentru animal un fapt atât de important din punct de vedere biologic, încât va fi memorizat și produs ulterior cu mai mare precizie și ușurință. Întărirea prin recompensă devine astfel condiție obligatorie a formării și evoluției reflexelor condiționate operaote. Ea asigură, printre altele, dresajul la scara animală. Având la bază fenomene motivaționale volitive, învățarea cu ajutorul acestei forme de condiționare presupune participarea obligatorie a scoarței cerebrale.

Răspunsurile condiționării operaote pot fi stinse, ca și cele ale condiționării clasice, dacă nu sunt întărite. Stingerea este un proces gradat, produs de lipsa întăririi anterioare. Pedeapsa, deși constituie un instrument util de învățare, nu trebuie opusă în mod necesar întăririi, întrucât poate determina efecte inverse asupra comportamentului. În mediul complex de viață, numeroși stimuli indiferenți devin, prin asociere cu alte forme de activitate ale organismului, excitanți condiționați producători de stereotipuri dinamice sau de noi reacții condiționate. Din punct de vedere EEG, nu sunt diferențe semnificative între condiționarea

pavlovistă (clasică) și cea operantă. Stabilind legături noi între stimulii repetați, din mediul extern sau intern, și diversele acte înăscute, reflexele condiționate dețin un rol important atât în reglarea funcțiilor vegetative, cât și în realizarea diferitelor forme de activitate comportamentală și neuro-psihică dobândite prin învățare. Substituirea stimulului condiționat cu cuvinte care semnifică excitanții respectiv stă la baza condiționării verbale.

Capacitatea de învățare depinde nu numai de condiționare, ci și de nivelul de inteligență, ca facultate cognitivă înăscută.

20.11.4. INTELIGENȚA

Inteligența poate fi definită drept capacitatea intelectuală înăscută de înțelegere, rezolvare și adaptare la noile probleme și condiții de viață. În afara factorului ereditar dominant, inteligența implică și un factor ambiental, socio-cultural. Plecându-se de la această dublă participare, s-au descris două forme de inteligență. Prima, denumită și inteligența A, privește eficiența cerebrală înăscută în determinarea vitezei și nivelului dezvoltării intelectuale a copilului într-un mediu ambiant optim. Cea de-a doua formă este inteligența de tip B, formată pe bază de învățare și modulare a zestreii ereditare sub influența mediului înconjurător. Nivelul inteligenței poate fi apreciat cu ajutorul testelor de inteligență (IQ), în funcție de gradul de maturare a sistemului nervos, de capacitatea de învățare și rezolvare a situațiilor sau problemelor formulate în acest scop. Dezvoltarea inteligenței este completă la vârsta maturizării nervoase, trecând prin stadiile de inteligență senzorio-motorie până la 2 ani, de gândire preconceptuală între 2 și 4 ani, gândire intuitivă între 4 și 7 ani, de operații concrete (concepte, clase, relații etc.) între 7 și 11 ani și de operații formale abstracte, specifice adolescentului și adultului. Ca și învățarea, inteligența, privită prin prisma teoriei holiste actuale, presupune integritate structurală, chimică și funcțională a emisferelor cerebrale. Performanțele sale sunt afectate de fenomenele patologice de degenerare neuronală. Stabilirea nivelului de inteligență prezintă o deosebită importanță socială.

20.11.5. GÂNDIREA

Gândirea, ca produs specific al creierului uman, reprezintă forma cea mai înaltă a cunoașterii, care oferă posibilitatea reflectării realității și proiectării acțiunilor viitoare. Depășind senzorialul și situându-se pe treapta superioară a activității logice, gândirea realizează pe baza informațiilor acumulate reflectarea lumii materiale sub formă de idei, în vederea rezolvării permanente a problemelor ridicate de viață și adaptării la solicitările mediului ambiant. Considerată ca formare de asocieri între idei, ea operează cu noțiuni care reflectă însușirile esențiale ale unui obiect sau fenomen din mediul înconjurător, extrase prin abstractizare. La rândul lor, noțiunile sunt grupate în diferite asocieri logice pe baza asemănării, contrastului, cauzalității, interdependenței etc., desemnând legăturile existente între obiecte și fenomene stabilite prin raționamente inductive și deductive. Bazele neurofiziologice, biofizice și neurochimice ale gândirii sunt insuficient cunoscute. În afara integrității morfo-funcționale a sistemului nervos central, ele presupun numeroase procese nervoase, cum sunt excitația și inhibiția, iradierea, concentrarea, inducția reciprocă, memorizarea, analiza și sinteza, generalizarea, abstractizarea, formarea legăturilor temporare între primul și cel de-al doilea sistem de semnalizare etc. Corelarea, integrarea și prelucrarea informațiilor fiind trăsături fundamentale ale gândirii, substratul material al acestor procese este reprezentat de activarea circuitelor neuronale implicate în memorare, condiționare și învățare din ariile nespecifice lobilor frontal, parietal și temporal. Activarea este determinată fie de explorarea lumii obiective pe baza senzațiilor, percepțiilor și reprezentărilor formate în cursul activității practice, fie de informațiile anterior stocate.

Prin procese de reverberație de-a lungul lanțurilor asociative neurovase, se realizează analiza, sinteza și compararea noilor informații cu cele anterioare, până la stabilirea congruenței acestora. Astfel, gândirea corelează și integrează fenomene, informații și diferite stări psiho-afective prezente cu elementele conștiente sau subconștiente engramate anterior, concretizându-se fie prin acte motorii, fie sub forma unor elaborări

ideative sau ideo-motorii (verbale). Ea este influențată atât de mediul fizico-biologic, cât și de cel social, întrucât se bazează nu numai pe experiența proprie, ci și pe cea a societății. Între gândire și limbaj există o veritabilă unitate, deși elemente de gândire sunt posibile și în afara limbajului (gândirea intuitivă, neverbală). Ca exemplu pot fi date cazurile de afazie cu păstrarea capacității de memorizare, învățare și gândire. Fenomene inverse, de dezorganizare profundă a gândirii, sunt posibile în cazurile de leziuni frontale. Deși limbajul nu este un mijloc indispensabil pentru efectuarea unor operații logice, el asigură comunicarea, fixarea și acumularea rezultatelor cunoașterii (gândirea verbală). De aceea, limbajul deține un rol însemnat în dezvoltarea gândirii logice. Limbajul, ca expresie materială a ideilor, este elementul formator al gândirii umane. Între limbajul gândit (interior) și cel exprimat verbal (exterior) există o strânsă unitate. Primul poate fi însoțit de articulații verbale sublimioare sau de manifestări electrice la nivelul mușchilor fonatori. Înregistrarea curenților de acțiune la nivelul laringelui în timpul efectuării unor operații mintale gândite pune adeseori în evidență descărcări electrice asemănătoare celor din timpul exprimării prin limbaj vorbit (exterior). Limbajul interior, precedând pe cel verbal, reprezintă, de fapt, procesul de gândire redus la elementele indispensabile gândirii verbale. Substratul neurofiziologic al relațiilor existente între gândire și limbaj este numai parțial comun, întrucât gândirea are sediu predominant în lobul frontal, foarte dezvoltat la om, în timp ce componenta centrală a limbajului se întinde de la baza circumvoluțiunii frontale ascendente (aria Broca) până la partea postero-superioară a lobului temporal din emisfera dominantă. La acest nivel confluează căile neuronale asociative de la nivelul lobilor frontal, parietal, temporal și occipital, formând aria interpretativă generală sau aria gnozie, descrisă de Wernicke. Distrugerea ariei Wernicke din emisfera nedominantă este urmată de pierderea funcțiilor intelectuale, începând cu incapacitatea de a citi și sfârșind cu tulburarea profundă a gândirii logice, până la demență. Stimularea electrică a ariei Wernicke alterează, de asemenea, funcțiile gnozie și interpretativă ale scoarței cerebrale, determinând halucinații auditive sau vizuale. Pe baza acestor dovezi clinico-experimentale, se admite că raționamentul intelectual și remanierea lui continuă în funcție de noile informații realizează activitatea integrată a scoarței cerebrale la nivelul ariei interpretative generale Wernicke din emisfera nedominantă. Tulburările proceselor complexe de gândire pot fi de conținut (obsesii, idei prevalente sau delirante), de ritm (accelerare sau lentoare ideativă), de coerență și de expresie verbală sau grafică. Ele au cauze variate și sunt consecința alterărilor metabolice și funcționale extinse, de regulă, și la alte zone cortico-subcortice decât cele fronto-parieto-temporale, care asigură funcțiile gnozie și interpretativă ale creierului.

Deși există o distribuție egală a ariilor corticale la nivelul ambelor emisfere cerebrale, acestea prezintă un oarecare grad de specializare. În timp ce emisfera stângă este dominantă pentru controlul motor fin în vederea asigurării performanțelor motorii, logice și analitice, emisfera dreaptă asigură percepția holistică, spațială, artistică și relațională. Nu întâmplător, majoritatea subiecților sunt dreptaci, întrucât emisfera stângă controlează activitatea motorie a jumătății drepte a corpului uman. În prezent se admite că emisfera stângă dominantă predomină la gânditori, iar cea dreaptă la creativi.

20.11.6. VORBIREA

Vorbirea constituie principala modalitate de exprimare și comunicare a diferitelor forme de activitate neuro-psihică umană. Împreună cu exprimarea grafică și gestică, vorbirea asigură limbajul oral, scris sau gestual, ca manifestări specifice de comunicare interumană. Depășind limitele sistemelor de comunicare proprii animalelor, creierul uman posedă capacitatea de a transmite prin vorbire diversele semnale codificate, stabilite convențional sub influența factorilor de mediu ambiental, familial și social.

Vorbirea reprezintă sinteza organică a proceselor fonematice (de percepere a sunetelor legate de vorbire), semantice (de înțelegere a semnificației cuvintelor), propoziționale (de stabilire a raporturilor corecte între cuvinte) și conceptuale (simbolice) a cuvintelor folosite. Ea evoluează de la simpla emisie de sunete cu modulații reduse și uniforme, ca rezultat al existenței unui reflex motor înăscut, până la stadiul de vorbire articulată, coerentă, cu particularități individuale și caracteristici locale, perfectibile în tot cursul vieții.

Funcțiile limbajului, în general, și ale vorbirii, în particular, sunt: comunicativă, cognitivă, emoțional-expresivă și imperativ-persuasivă (ordine, invitație, rugămintă, sfat etc.).

Vorbirea începe spre sfârșitul primului an de viață prin imitarea cuvintelor auzite, ceea ce presupune integritatea sistemului auditiv. Dacă pronunția nu este fidelă, prin comparare auditivă și corectări repetate de articulare se ajunge la pronunțarea corectă a cuvintelor. Însușirea vocabularului se realizează prin condiționare reflexă, cuvântul pronunțat fiind asociat în mod repetat cu vederea obiectului sau persoanei pe care o reprezintă. Ulterior, copilul reușește să arate obiectul sau persoanele al căror nume se pronunță, recunoscându-le ca urmare a asocierilor audio-vizuale. În felul acesta, se constituie limbajul vorbit, care se îmbogățește progresiv prin învățare. Substituindu-se primului sistem de semnalizare, cuvintele devin, după expresia lui Pavlov, „semoale ale semnalelor”, iar vorbirea reprezintă cel de-al doilea sistem de semnalizare.

În elaborarea limbajului vorbit este indispensabilă participarea aparatului auditiv. În acest sens pledează faptul că surdul din naștere rămâne mut și că surditatea survenită sub 5 ani determină pierderea limbajului articulat. La rândul său, limbajul scris începe să se dezvolte la vârsta de 5-6 ani, elaborarea sa realizându-se prin mecanisme reflex condiționate analoage celor ale limbajului oral. Scrisul are la bază însușirea imaginilor vizuale ale literelor, cifrelor și cuvintelor prin învățare, dublată de stabilirea relațiilor dintre cuvintele auzite și cele scrise. Atât limbajul vorbit, cât și cel scris comunică mesaje care se referă la modul de reflectare a realității obiective în sistemul nervos central, sub forma unor simboluri exprimate verbal sau grafic.

Bazele neurofiziologice ale vorbirii sunt incomplet elucidate. Aferențele senzitivo-senzoriale auditive, vizuale, tactile, kinestezice etc., ajunse sub forma impulsului nervos modulată în amplitudine și frecvență la nivelul zonelor corticale de proiecție specifică, sunt integrate, analizate și decodate, dând naștere percepțiilor primare respective. De la nivelul zonelor corticale specifice, informațiile decodate sunt dirijate prin intermediul ariilor interpretative din jur la zonele de alegere, formare și exprimare a cuvintelor din emisfera dominantă, în vederea încodării și elaborării comenzilor neuro-electorice motorii spre organele fonatorii emițătoare de sunete articulate. Aceste zone sunt reprezentate de aria vorbirii Broca, situată la baza circumvoluției frontale ascendente (aria 44 - Brodman) și de aria interpretativă generală, sau gnozie, descrisă de Wernicke la nivelul zonei postero-superioare a lobului temporal. De fapt, întreaga suprafață corticală fronto-temporo-parieto-occipitală dintre centrul vorbirii (Broca) și aria interpretativă Wernicke constituie dispozitivul nervos al limbajului vorbit (fig. 20.32).

Numeroase observații clinice confirmate de cercetări clinico-experimentale au demonstrat lateralizarea vorbirii. În timp ce leziunile emisferului stâng produc afazie, cele ale emisferului drept nu determină decât excepțional tulburări afazice. Pe această bază s-a conchis că emisfera stângă este dominantă la persoanele drepte și invers la cele stângace. La aproximativ 90-95% din persoanele sănătoase, emisfera stângă este dominantă. La acestea, aria interpretativă Wernicke din partea stângă este cu peste 50% mai mare decât cea a emisferului drept.

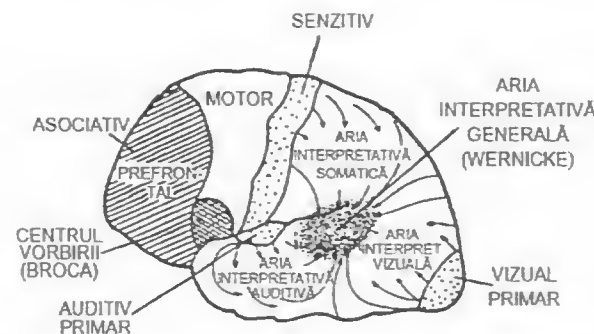


Fig. 20.32. Dispozitivul nervos central al limbajului vorbit.

Localizarea nefiind riguroasă în multe cazuri și, mai ales, la ambidextri, atât leziunile emisferului stâng, cât și ale celui drept produc afazie. La rândul său, afazia este predominant motorie, sau de exprimare, în cazul lezării ariei Broca, din cauza relațiilor sale de imediată vecinătate cu cortexul motor, care controlează mușchii feței, limbii, palatului și laringelui. Pacientul înțelege în acest caz cuvintele auzite sau scrise, dar este incapabil să le pronunțe, chiar dacă nu prezintă paralizia mușchilor respectivi. În majoritatea cazurilor, afazia motorie se însoțește de hemiplegie dreaptă, datorită extinderii leziunilor corticale. Când acestea privesc aria interpretativă Wernicke, afazia este de tip senzorial. Bolnavul aude ce i se spune, dar nu înțelege sensul cuvintelor, prezentând surditate verbală. Totodată, nu înțelege semnificația cuvintelor scrise, tulburare denumită cecitate verbală, sau alexie. Fenomenele afazice se însoțesc, în astfel de cazuri, de scăderea capacității intelectuale. Polimorfismul tulburărilor afazice depinde de extinderea leziunilor nervoase create de vicierea irigației asigurate de artera silviană. Componenta corticală a limbajului vorbit acționează prin intermediul căilor nervoase motorii asupra musculaturii organelor fonatorii, de producere și articulare a sunetelor. Acestea aparțin aparatului respirator, pe de o parte, și segmentului superior al tubului digestiv, pe de altă parte. Vorbirea la nivelul periferic se realizează în timpul expirului, cu participarea a trei principale sisteme:

- sistemul energetic (respirator), care asigură producerea sunetelor la nivelul aparatului generator, reprezentat de mușchii expiratori;
- sistemul generator de sunete, cu o componentă tonală (laringe și corzi vocale) și alte generatoare de zgomote (buze, limbă, dinți, palat dur și văl moale);
- sistemul rezonator, reprezentat de cavitățile modulatorie (gură, faringe-laringe) și nemodulatorie (cavitate nazală și nazo-faringe).

Producerea sunetelor la nivelul laringelui ca organ al fonației este prezentată la subcapitolul consacrat fenomenelor accesorii ale respirației.

20.11.7. AFECTIVITATEA

Afectivitatea cuprinde totalitatea trăirilor afectiv-emoționale care reflectă atitudinea și relațiile subiective față de realitatea obiectivă. Având caracter pregnant subiectiv, afectivitatea se manifestă sub forme variate de dispoziții, emoții, sentimente, afecte și pasiuni.

Dispozițiile sunt trăiri afective latente, legate de starea funcțională a organismului, reflectând gradul de adaptare la factorii de ambianță. Emoțiile sunt reacții afective puternice, de scurtă durată, create de situații neprevăzute ale organismului. Ele se manifestă sub diferite stări afective, negative și pozitive, de la anxietate și furie, până la plăcere și fericire.

Sentimentele sunt manifestări afective specifice omului, ce reflectă relațiile complexe interumane și cu mediul înconjurător, în general.

Afectele sunt trăiri emoționale intense, bruște și de scurtă durată, însoțite de modificări gestuale (somatice) și neuro-vegetative.

În sfârșit, pasiunile sunt stări afective intense și stabile, cu impuls puternic volițional spre activitate.

Toate formele de comportament afectiv-emoțional au un puternic suport motivațional, care direcționează diversele forme de activitate ale individului spre satisfacerea dorințelor biologice sau spirituale ale acestuia. Ele se răsfrâng nu numai asupra activității psihice, ci și asupra organelor interne, prin intermediul sistemului nervos vegetativ și al verigii neuro-endocrine. Datorită interdependenței dintre trăirile afectiv-emoționale și cele somatice, emoțiile dețin un loc important în patogeneza bolilor psiho-somatice.

Deregările somatice de cauză psiho-emoțională se realizează pe trei căi principale: neuro-motorie somatică, neuro-vegetativă și hormonală, cu participarea complexului hipotalamo-hipofizar și a glandelor subordonate acestuia. Ca urmare a stării de hiperactivitate somato-vegetativă și neuro-endocrină, apar fenomene de hiperexcitabilitate musculară, anxietate, insomnii, urmate de oboseală, palpitații, constipație, spasme dureroase ale musculaturii tubului digestiv, hiperiridie, dismenoree.

Formațiunile nervoase implicate în afectivitate alcătuiesc ansamblul cortico-subcortical denumit sistem limbic sau „creier emoțional”. Acesta este format din numeroase structuri nervoase: paleocortice (hipocampus, cornul Ammon, lobul piriform, bulbul olfactiv, girusul dințat, girusul cingulat), subcortice (amigdala, aria septală, nucleii anteriori talamici, nucleii hipotalamici, nucleii reticulari mezencefalici) și

neocortice, aparținând cortexului asociativ prefrontal. Dispuse sub forma a două inele în jurul formațiunilor diencefalo-mezencefalice, structurile paleocortice asigură legătura dintre neocortex și partea inferioară a sistemului limbic, în centrul căruia se găsesc nucleii hipotalamici.

Bucula închisă, formată de conexiunile neuronale dintre hipocampus, fornix, corpii mamilari hipotalamici, nucleii talamici anteriori, cortexul cingulat și înapoi la hipocampus, constituie circuitul sau bucla Papez. Prin intermediul acesteia se realizează componenta psiho-emoțională a diverselor forme de comportament. Fenomenul de postdescărcare prelungită de la acest nivel explică durata mai mare a răspunsului emoțional decât a stimulului care l-a declanșat.

Sistemul limbic și, în special, nucleul amigdalian reglează comportamentul afectiv al individului. Leziunile bilaterale ale zonei amigdalo-hipocampice sunt urmate de amnezie și agnozie vizuală, însoțite de hipersexualitate. Excitarea electrică determină creșterea debitului verbal și percepții senzoriale plăcute. Stimularea nucleului amigdalian provoacă, din contră, o senzație de frică, urmată de furie. La animale, excitarea amigdalei hipocampusului, talamusului și tegumentului mezencefalic produce frică, iar cea a septului și regiunii preoptice provoacă plăcere. Complexul neural hipotalamic exercită o puternică funcție moderatoare asupra comportamentului afectiv. Distrugerea sa determină hiperactivitate și hiperemotivitate în cazul suprimării nucleilor hipotalamici anteriori. Efecte similare apar în cazul stimulării hipotalamusului postero-lateral, însoțite de tahicardie, creșterea presiunii sanguine și reacții motorii de furie și agresivitate (luptă). La producerea acestora participă sistemul nervos simpatic, prin intermediul căruia se realizează modificările organice din emoții (fig. 20.33). În timp ce stimularea hipotalamusului antero-median provoacă liniștirea animalului, cea a nucleilor periventriculari determină reacții de teamă și pedeapsă. Un rol important revine hipotalamusului și în producerea senzației de plăcere, respectiv de recompensă. Excitarea repetată a unui nucleu din hipotalamusul ventro-median, prin intermediul electrozilor cronici generatori de senzații plăcute, determină animalul de experiență să se autostimuleze prin închiderea circuitului electric, cu ajutorul unui levier pe care apasă cu frecvență crescândă de până la 10 000 pe oră (Olds, 1961).

La rândul său, cortexul frontal determină modificări în comportamentul emoțional, îmbogățind și amplificând reacțiile emotive necondiționate cu altele condiționate sau evocând emoții pe baza unor amintiri și situații trăite în trecut. În general, scoarța cerebrală exercită, ca și rinencefalul, o acțiune inhibitoare asupra formațiunilor nervoase diencefalice. La animalele decorticate, reacțiile emotive sunt mai brutale, căpătând un caracter violent (pseudofurie). În timpul stărilor de încordare emoțională se produc fenomene electrice de activare corticală, reprezentate de dispariția undelor alfa pe EEG. Cortexul, la rândul său, poate controla, modula și adapta până la un punct comportamentul afectiv în condițiile impuse de mediul extern sau intern.

Exprimarea stărilor emoționale se realizează pe căi multiple, voluntare și involuntare, începând cu expresia feței și a vocii și sfârșind cu modificările unor funcții vegetative (ritmul cardiac, temperatura cutanată, colorația tegumentelor etc.) și endocrine (hipersecreția de catecolamine, ACTH, corticoizi etc.).

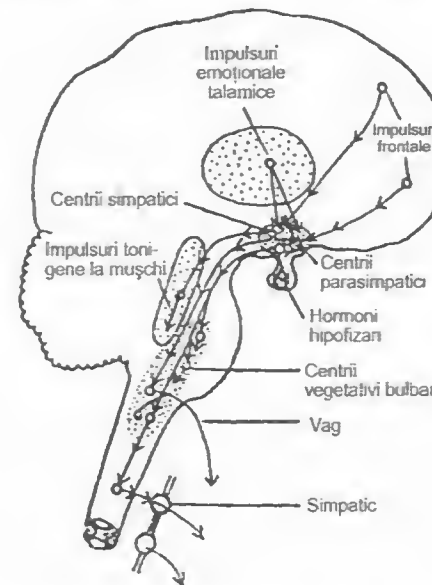


Fig. 20.33 Influențe cortico-subcortice asupra descărcărilor simpatic-periferice.

20.12. LICHIDUL CEFALORAHIDIAN

Cavitatea craniană și medulară are un volum de aproximativ 1 650 ml, din care doar 140–150 ml sunt ocupați de lichidul cefalorahidian (LCR). Acesta se găsește în ventriculii cerebrali, cisterne și spațiul subarahnoidian din jurul creierului și măduvei spinării. Formarea sa are loc la nivelul plexurilor coroide și suprafețelor endependimare ale ventriculilor cerebrali, depinzând de intensitatea proceselor de ultrafiltrare a plasmăi și de transport activ al ionilor de sodiu prin celulele epiteliale care câtușesc plexurile coroide la exterior. Trecerea ionilor de sodiu și clor de pe fața externă a plexurilor în LCR este urmată de cea a apei și, în mai mică măsură, de trecerea glucozei. Procese inverse de deplasare a ionilor de potasiu și bicarbonat au loc concomitent spre teritoriul capilar. LCR astfel format prezintă concentrația sodiului și presiunea osmotică egale cu ale plasmăi; clorul este cu aproximativ 15% mai crescut decât în plasmă, iar potasiul și glucoza, cu 30–40% mai reduse ca în plasmă.

Din cei 500 ml de LCR formați zilnic, 2/3 sunt absorbite la nivelul cililor arahnoidali.

Aceștia se găsesc sub formă de prelungiri microscopice digitale, coocentrate la nivelul granulațiilor arahnoidiene proeminente în sinusuri. Funcția limfatică de drenaj al plasmăi interstițiale este suplăată în cazul creierului de spațiile perivasculară, ca puncte de trecere spre teritoriul subarahnoidian și, de aici, în venele cerebrale, prin cilii arahnoidali. Curgerea LCR este de tip turbulent, din ventriculii laterali în ventriculul III, prin gaura Monro, și spre ventriculul IV, prin apeductul Sylvius. De aici, LCR coboară, prin foramenul lateral Luschka și foramenul medial Magendie, spre cisterna magna, de unde difuzează apoi în spațiile subarahnoidiene cerebrale și perimedulare, precum și în cavaul epedimar.

Presiunea LCR prezintă în poziție orizontală o valoare medie de 130 mm apă (10 mmHg), cu variații între 70 și 180 mm apă.

Reglarea presiunii LCR este insuficient cunoscută. Ea pare a fi dependentă de intensitatea proceselor de absorbție de la nivelul cililor arahnoidali. Aceștia se comportă ca veritabile valve, ce direcționează întoarcerea LCR în sângele venos, cu o presiune doar de câțiva mmHg, superioară presiunii venoase. Alterarea funcției de resorbție a cililor în unele stări patologice (tumori, infecții etc.) este urmată de creșterea presiunii LCR. Determinarea acesteia se face prin puncție lombară în poziție culcat pe o parte, cu ajutorul manometrului Claude.

Integritatea schimburilor lichidiene la nivel cerebral depinde de integritatea structurală și funcțională a barierei hemato-encefalice, pe de o parte, și a barierei hemato-lichidiene, pe de altă parte.

Bariera hemato-encefalică este bariera dintre sânge și țesutul nervos propriu-zis. Ea este constituită din microstructuri specializate, care împiedică o parte din substanțele solvite în plasmă să ajungă la neuroni. Excepție fac doar zonele lipsite de barieră hemato-encefalică (aria postrema, eminența mediană, organelul subfornical sau organul vascular al laminei terminale), permeabile la hormonii peptidici periferici.

La rândul său, bariera hemato-lichidiană, deși reprezintă doar 1/5 000 din suprafața mare a barierei hemato-encefalice, deține rolul principal în formarea LCR. Plexurile coroide, ca principal constituent al acesteia, prezintă pori la nivelul endoteliului capilar, cu diametrul de 110–120 Å, și vezicule de pinocitoză, de 250 Å. Grație acestora, coeficientul de filtrare a apei la nivelul plexurilor coroide este de 4 ori mai mare decât în restul creierului.

Endimul care tapetează ventriculii cerebrali, reprezentând structura prin care comunică cele două bariere, asigură legătura între LCR și spațiul interneuronal, estimat la 12% din masa cerebrală.

Funcțiile LCR sunt multiple. În primul rând, LCR îndeplinește un rol mecanic, de protecție a țesutului nervos cerebral contra traumatismelor. În al doilea rând, el este loc de revărsare și transport al unor hormoni de la locul de secreție la locul de acțiune, ca în cazul deplasării hormonilor pineali la hipotalamus. La rândul său, compoziția chimică a LCR influențează profund funcțiile țesutului nervos cerebral. Ca exemplu se poate menționa creșterea cu numai 0,05 unități a pH-ului LCR, urmată de intensificarea de 4 ori a ventilației pulmonare.

Efecte activatoare sau inhibitoare se obțin în cazul administrării intracerebro-ventriculare a unor hormoni.

Importanța fiziologică a barierei hemato-encefalice constă în protejarea țesutului nervos cerebral de substanțele dăunătoare din sânge, începând cu produșii toxici de degradare și sfârșind cu hormonii sau mediatorii chimici circulanți. În unele condiții patologice (tumori hipofizare invazive), bariera se poate deschide, determinând creșterea concentrației serice a hormonilor secretați în exces.

21. ELEMENTE DE FIZIOLOGIE AMBIENTALĂ

Organismul și mediul formează un tot inseparabil.

CL. BERNARD

21.1. HOMEOSTAZIE ȘI ADAPTARE

Generalități. Organismul și mediul în care trăiește acesta constituie bioul fundamental al ecologiei (etimologic: gr. *oikos* = casă și *logos* = știință). Aflată actualmente în plină dezvoltare, ecologia are ca obiect studiul științific al raporturilor ființelor vii cu mediul lor natural, dar și apărarea acestui mediu în condițiile societății moderne, industrializate. Mediul, prin factorii săi de o extremă diversitate, determină reacțiile fiziologice de adaptare ale organismului. Cunoașterea diversității și amplitudinii acestor reacții, a limitelor în care ele fac posibilă menținerea homeostaziei organismului reprezintă o preocupare constantă a fiziologilor. Datele existente în prezent permit diferențierea unei ramuri distincte a fiziologiei, care ar putea fi intitulată *fiziologie ambientală*, sau, pentru a accentua filiația sa din ecologie, drept *ecofiziologie*. În mod obișnuit, cărțile de sinteză din domeniul fiziologiei, asemenea celei de față, ou conțin capitole distincte referitoare la acțiunea factorilor normali ai ambianței asupra organismului, aceste date fiind dispersate în cadrul fiziologiei sistemelor din organism, funcție de acțiunile cele mai caracteristice ale factorilor de mediu respectiv. În realitate, conturarea certă a unei ramuri a fiziologiei referitoare la natura și mecanismele răspunsurilor organismului la mulți factori de mediu ne obligă la redactarea prezentului capitol. Înainte de a examina acești factori este necesară o delimitare în raport cu alte domenii ale medicinei, pentru care studiul factorilor respectivi reprezintă, de asemenea, domenii de preocupare. Dintre disciplinele fundamentale, biofizica are ca obiect și studiul acțiunii unor astfel de factori, utilizând în acest scop concepte și metode adecvate: igiena, cu diversele direcții de evoluție, începând cu igiena generală și continuând cu igiena muncii, sau chiar tendințele moderne de dezvoltare ale epidemiologiei. Se conturează, astfel, o abordare interdisciplinară a complexei interacțiuni mediu-organism. Cât aparține, din acest teritoriu, fiziologiei? Evoluția actuală a cunoașterii a estompat frontierele tradiționale și, încercând să precizăm această delimitare, vom menționa că factorii de mediu trebuie luați în considerație de către fiziolog în măsura în care ei intervin în determinismul funcțiilor normale ale organismului.

O analiză a implicării factorilor ecologici în domeniul fiziologiei este dificilă, deoarece omul nu intră în scena ecologică ca oricare animal, așa cum observa H. Dorst. El introduce cultura sa materială ce modifică mediul până la efectuarea acestuia, diferență esențială în raport cu celelalte viețuitoare. Omul s-a adaptat la condiții de viață din cele mai diverse și s-a răspândit pe tot pământul într-o epocă foarte precoce din istoria sa, fapt inexplicabil dată fiind slaba densitate a populației în perioada respectivă. Ca urmare, el a reușit să reziste la agresiunea unor factori fizici externi, în cadrul unor ecosisteme dintre cele mai variate.

Colonizarea unor medii foarte diverse a avut consecințe profunde în fiziologia umană, datorate factorilor fizici (îndeosebi temperaturi extreme, umiditate, radiații, variații ale presiunii atmosferice) și consecutive regimurilor alimentare impuse de calitatea produselor posibile în mediile respective. În consecință, multe etnii prezintă caractere genetice particulare, care le procură avantaje incontestabile pentru

a rezista la unii factori agresivi din mediile în care acestea s-au stabilit. Exemplele sunt numeroase și ne oprim doar la câteva: în cea mai mare parte a etniilor rămase la o civilizație preindustrială, unele constante fiziologice, cum este colesterolemia; se mențin mai favorabile decât la europeni și americani; ca urmare, afecțiunile cardio-vasculare sunt rare sau chiar necunoscute; greutatea corporală nu crește, în general, cu vârsta, indiferent de regimul alimentar. Este cazul pigmeilor africani, care trăiesc în păduri dense și sunt aproape exclusiv vegetarieni. Cu toată starea sanitară submediocră, ei probează o rezistență extraordinară, justificată de constantele fiziologice. Grupurile de agricultori din estul Africii, cu regim, de asemenea, predominant vegetarian, nu cunosc ateroscleroza și infarctul miocardic. Mai curios este faptul că alte grupuri, din aceeași regiune, ca tribul Masai, deși consumă în primul rând carne și lapte, cu o importantă absorbție cotidiană de colesterol, nu suferă de boli cardio-vasculare. Membrii acestui trib prezintă o adaptare surprinzătoare a metabolismului colesterolului, în sensul absenței oricărei sinteze endogene. Exemplele pot continua.

În raport cu civilizațiile preindustriale, condițiile de mediu, îndeosebi în Europa și America de Nord, au fost substanțial modificate prin poluarea consecutivă activităților industriale și chiar existenței unor factori poluanți în mediul casnic. Un răspuns fondat pe supoziția că viața modernă conține factori care solicită continuu mecanismele homeostazice, uneori până la depășirea resurselor de adaptare a omului, este dificil, așa cum este simplist să se opună calmul relativ al vieții rurale cu agitația orașelor. Argumentele științifice în cercetarea relației om-mediu se obțin cu dificultate, obligând la o vastă investigație interdisciplinară. Pentru caracterizarea interacțiunii organism-mediu, sunt necesare câteva delimitări terminologice; descriptiv, se disting un mediu general, sau macro-mediu al zonei topografice studiate, și un micro-mediu. Micro-mediu este determinat de caracteristicile locale ale mediului, consecutive particularităților luminii solare, radiațiilor, umidității aerului și solului, curenților de aer, existenței unor concentrații de substanțe favorabile sau defavorabile vieții. Aceste micro-medii posedă microclimatul în particular în raport cu climatul general (macroclimat) al regiunii. Inițial, termenul de microclimat se referea la factorii de climat aerian, dar în ecologia modernă el a dobândit o semnificație mai completă, înglobând microclimatul termic, hidric, osmotic, salin, al microelementelor etc.

Când se studiază un mediu natural, de obicei se efectuează o distincție didactică între *factorii abiotici* și cei *biotici*. Factorii abiotici sunt reprezentați de lumină, temperatură, umiditatea aerului, compoziția chimică a apei, presiunea atmosferică și hidrostatică, structura fizică și chimică a solului. Factorii biotici sunt determinați de prezența, alături de un organism, a organismelor din aceeași specie sau din specii diferite, care exercită asupra acestuia o concurență, o competiție. Alți factori biotici depind de fiziologia organismului considerat: ritm de creștere, alimentație, reproducere, durată de viață, capacități metabolice diverse, ritmuri endogene de activitate, posibilități de deplasare.

În realitate, factorii abiotici sunt puternic influențați de factorii biotici, respectiv de prezența organismelor. Pentru animale, inclusiv pentru om, aproape toți factorii abiotici ai mediului sunt triați, filtrați, modificați prin vegetație, care constituie pentru faună deopotrivă o sursă de hrană, ca și de oxigen și de adăpost.

Dezvoltarea recentă a psihofiziologiei și etologiei ca știință a comportamentului (se știe că trei cunoscuți etologi au primit în anul 1973 premiul Nobel pentru fiziologie și medicină) permit acordarea unui loc distinct, în cadrul ecofiziologiei, factorilor de mediu de ordin psihic. Omul, cu psihismul său evoluat, reușește să controleze în mare măsură o serie de factori ai mediului înconjurător. Dacă luăm în considerare controlul aproape total exercitat de om asupra biosferei, acceptăm rațiunea pentru care în ecologie se acordă un loc particular factorilor psihici.

Homeostazie și adaptare. Pentru caracterizarea acțiunii globale a factorilor de mediu asupra organismului, se impune delimitarea a două concepte fundamentale: homeostazie și adaptare.

Organismele nu se supun niciodată pasiv la acțiunea factorilor din mediu, chiar fiind cele mai primitive tinzând să reacționeze la aceste forțe prin diferite modalități de adaptare. Caracteristicile acestei adaptări reprezintă individualitatea fiecărui organism și sunt responsabile de conservarea sănătății sau, dimpotrivă, de apariția bolii. Față de variațiile mari ale factorilor de mediu, organismele și-au creat o constantă de structuri și funcții, pentru ca în orice împrejurări să poată rămâne în viață, să se adapteze și să se autoconserved.

Claude Bernard a afirmat primul, cu claritate, că viața și sănătatea depind de capacitatea organismului de a menține constanța mediului intern, într-un mediu ambiant variabil.

Starea de echilibru a mediului intern constituie condiția de bază a existenței, adaptării și evoluției organismelor vii. Acestea sunt sisteme deschise, în perpetuă remaniere și acțiune reciprocă eu mediul înconjurător. Concepute în timp și spațiu și privite prin prisma nivelurilor de organizare a materiei vii, noțiunile de echilibru și constanță a mediului intern au reprezentat adevăruri fundamentale, care au contribuit substanțial la progresele actuale ale fiziologiei. Ulterior, Walter B. Cannon, preluând și dezvoltând conceptul de constanță a mediului intern, insistă asupra importanței sistemelor de reglare ce permit organismului să reacționeze util la stimulii furnizați de mediu și să se adapteze la condițiile impuse de acesta. El a admis că adaptarea fiziologică consecutivă reacțiilor biologice provoacă în mod inevitabil o serie de modificări interne, care pot îndepărta temporar organismul de starea ideală de constanță a mediului intern, definind astfel noțiunea de *homeostazie*. Cuvântul homeostazie vine de la grecescul „*homoios*” (asemănător) și „*stasis*” (stare) și semnifică păstrarea unei stări asemănătoare cu ea însăși. Homeostazia conferă stabilitate relativă structurilor și funcțiilor vitale, asigurând menținerea în limite constante a unei stări proprii, deși condițiile de mediu sunt variabile. Homeostazia este așadar capacitatea organismului de a-și asigura constantele și funcțiile normale prin reacții neuro-endocrino-metabolice de autoreglare și control. Realizarea homeostaziei presupune două condiții fundamentale: (a) organismul să funcționeze normal, în măsura în care el poate opera rapid adaptările necesare, astfel încât compoziția mediului intern să rămână în limite precis definite; (b) reacțiile la variațiile mediului trebuie să asigure desfășurarea normală a funcțiilor fiziologice în noile condiții de viață. Pentru continuitatea vieții, aceste două condiții sunt capitale și indispensabile fiecărui organism.

Noțiunile de homeostazie și adaptare sunt complementare și valabile la toate nivelurile de organizare biologică, aplicându-se atât grupurilor sociale, cât și organismelor uni- sau pluricelulare. Termenul de homeostazie conține și o încărcătură abstractă, care scapă prezentărilor simplificatoare. Astfel, definiția curentă a homeostaziei, ca tendință a organismului de a-și menține constanți, sub acțiunea diversilor factori perturbanți, o serie de parametri fiziologici, biochimici, biofizici și morfologici presupune mecanisme biocibernetice de autoreglare și control prin reacții de *feed-back* negativ și pozitiv. Așa cum s-a văzut în capitolele anterioare privind autoreglarea diverselor funcții somato-vegetative, acest proces de servomecanism realizează fie revenirea la starea inițială, fie revenirea la o stare echivalentă. El poate lua o alură excesivă, ori o alternativă nocivă pentru organism, ieșindu-se astfel din limitele normalului și ale homeostaziei fiziologice. Progresele cercetării, îndeosebi către substratul molecular al funcțiilor organismului, au condus la diversificarea extremă a conceptului de homeostazie, iar organismul uman apare în prezent mai eurănd ca rezultat al armoniei dintre mai multe homeostazii (circulatorie, respiratorie, hidroelectrolitică etc.). Printre acestea figurează și homeostazia imunologică.

Binomul ființă vie-mediu are o importanță particulară în cazul omului, deoarece organismul uman continuă să evolueze lent pe plan fiziologic și anatomic, în timp ce forțele sociale și elementele de civilizație au o pondere tot mai importantă în această evoluție. În condițiile vieții trepidante moderne, factorii denumiți socio-culturali devin tot atâ de importanți ca factori de mediu. În noile condiții, „fixitatea mediului intern” a lui Claude Bernard și „homeostazia” lui W. B. Cannon sunt interpretate ca mecanisme prin care organismul apără capacitatea sa de adaptare împotriva unor factori de mediu ce se schimbă neîncetat. Dar, homeostazia fiziologică și biochimică, ca bază a existenței evoluției, nu cuprinde toate mecanismele prin care organismele reacționează, adaptându-se la stimulii furnizați de mediu. Există și alte posibilități de reacție situate la limita dintre normal și patologic. Ca exemple pot fi date reacțiile biologice determinate de stres.

Siresul, ca fenomen de încordare, forțare și suprasolicitare, reprezintă, după cum se știe, atât starea de agresiune exercitată asupra organismului, cât și reacțiile de adaptare și apărare la diversele solicitări din mediul extern sau intern. Deși este cunoscut de multe secole (medicul persan Avicenna a dovedit încă din secolul al XI-lea posibilitatea morții unui miel plasat în preajma lupului), fenomenul nu a fost precizat decât după ce Hans Selye (1936) inițiază cercetări sistematice asupra alterărilor morfologice și funcționale produse de diverșii factori de agresiune fizică, chimică, biologică, psihică sau socială.

În prezent, sunt bine cunoscute cele două mari categorii de reacții de apărare și adaptare la solicitări. În afara reacțiilor generale și locale specifice fiecărei agresiuni, se produc importante răspunsuri adaptative nespecifice de natură nervoasă și endocrină, în vederea creșterii rezistenței organismului și evitării alterărilor morfo-funcționale generatoare de stări patologice. Din această a doua categorie fac parte fenomenele menționate deja, de predominanță simpatică, dublate de stimularea complexului

hipotalamo-hipofizar secretor de hormoni adenohipofizari cu răsunetul corespunzător asupra secreției de hormoni suprarenali, tiroidieni și gonadali. Ansamblul reacțiilor neuro-endocrino-metabolice care apare în timpul expunerii prelungite a organismului la stres a fost denumit de Selye (1939) sindrom general de adaptare (SGA), iar de către Laborit (1955), reacție oscilantă postagresivă (ROPA).

Reacțiile biologice postagresive nespecifice din sindromul general de adaptare evoluează la animale și om în trei stadii. Într-un prim moment are loc reacția de alarmă, în care se produc fenomene de șoc și contrașoc predominant nervoase, de natură simpatico-adrenergică. Acestea sunt urmate de descărcări neurohormonale multiple, în vederea creșterii rezistenței organismului și restabilirii echilibrului homeostazic. Astfel, în faza a doua, de rezistență, se eliberează sub influența stimulării complexului hipotalamo-hipofizar mari cantități de ACTH, TSH și gonadotrofine, urmate de lansarea în circulație a hormonilor catabolizanți (glucocorticoizi și tiroidieni), pe de o parte, și anabolizanți (gonadali, mineralocorticoizi), pe de altă parte (fig. 21.1).

Participarea acestora la reacțiile de apărare și rezistență hotărăște evoluția dezechilibrului produse de factorul stresant spre restabilire și normalizare sau spre stadiul al treilea, de epuizare și evoluție patologică, generatoare de boli de adaptare.

Trecerea de la reacția primară, de alarmă, la faza următoare, de rezistență, se realizează după cercetările noastre cu participarea sistemului renină-angiotensină (SRA) ca punte de legătură între cele două tipuri de răspuns. Aparatul juxtaglomerular renal fiind sub controlul inervației splanhnice, descărcările adreno-simpatice din timpul reacției de alarmă produc nu numai eliberare de caecolamine ci și de renină, formatoare de angiotensină. La rândul său, angiotensina II activă stimulează atât reacțiile metabolice eliberatoare de adrenalină, ACTH și glucocorticoizi, cât și pe cele anabolice produse de hormoni mineralocorticoizi și gonadali.

În sprijinul participării SRA la sindromul general de adaptare pledează stimularea de către angiotensină a secreției de caecolamine, aldosteron, cortizol și ACTH ca hormoni ai stresului, precum și eliberarea de peptide opioide (endorfine, enkefaline, dinorfine) ca factori antistres, constatată de numeroși autori în ultimii ani.

Evoluția trifazică a SGA, ca reacție adaptativă a organismului la diferiți factori stresanți, depinde atât de intensitatea și durata stresului, cât și de reactivitatea individuală a subiectului respectiv. Același agent stresant va produce răspunsuri variate la diferite persoane în funcție de constituția genetică, echilibrul homeostazic, reactivitatea și rezistența organismului, mediul social și cultural etc. Organismele al căror sistem nervos este bine dezvoltat pot să aleagă între mai multe mecanisme, adoptând tipuri de comportament destinate fie adaptării la noile condiții impuse de mediu sau abolirii și neutralizării factorilor de stres, fie pentru a ieși din raza de acțiune a acestora. Ele pot alege între mai multe mecanisme, pentru a reacționa adecvat prin comportamentul lor, sau, dimpotrivă, să ignore pur și simplu unii stimuli. Tipurile de reacții cele mai evaluate sunt procesele de adaptare socială, prin care un anumit subiect sau grup modifică mediul, sau obiceiurile, pentru a se adapta mai bine la nevoile și preferințele pe care le au.

Cercetările privind rolul factorilor psiho-sociali în producerea reacțiilor de adaptare la stres par să demonstreze că aceștia provoacă dereglări hormonale diferențiate și mai complexe decât alți stresori. Ca exemplu pot fi date dezechilibrul neuro-endocrine constatate la membrii unor colonii de animale. S-a constatat că animalul dominant prezintă concentrații sanguine mai mari de adrenalină, ACTH, corticosteron și testosteron decât animalele subordonate. Acestea din urmă eliberează, în schimb, cantități mai mari de prolactină și beta-endorfină. La om, stresul determină dereglări neuro-endocrine și metabolice mai brutale la subiecții cu reacții simpatico-adrenergice exagerate și comportament agresiv, constituind unul din principalii factori de risc cardio-vascular.

În funcție de tipul și intensitatea descărcărilor hormonale determinate de diverși factori stresanți, reacțiile nespecifice de stres au fost împărțite în două grupe principale. Răspunsurile biologice generatoare de reacții neuro-endocrino-metabolice adecvate, care asigură rezistența și restabilirea echilibrului homeostazic fără consecințe dăunătoare organismului, au fost denumite *reacții de eustres*. Cele inadecvate sau insuficiente, producătoare de oboseală, reacții comportamentale negative sau boală poartă numele de *distres*. S-a încercat diferențierea eustresului de distres în funcție de concentrația plasmatică a hormonilor medulo-și corticosuprarenali.

Creșterea numai a adrenalinei circulante ca factor sensibilizant la efectele tisulare ale hormonilor corticosuprarenali ar caracteriza eustresul. În distres apare crescută secreția ambelor tipuri de hormoni

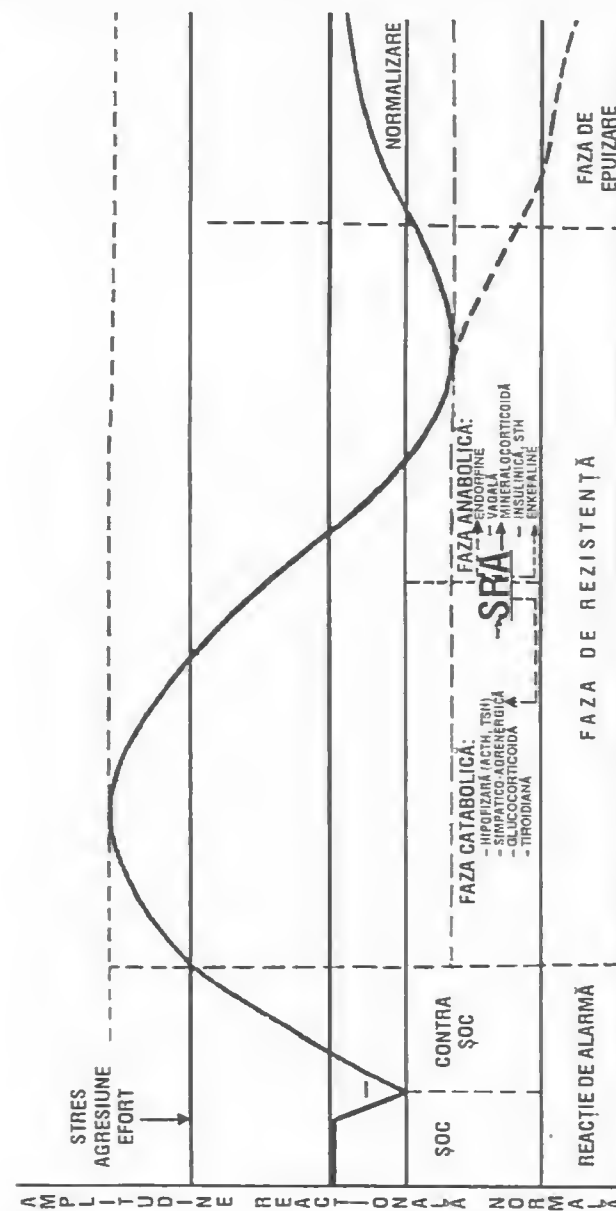


Fig. 21.1. Reacțiile biologice postagresive din sindromul general de adaptare.

sincronizatoare. Sincronizatorii ambianței nu induc noi bioritmuri, dar modifică în proporții variabile parametrii caracteristici ai acestora.

Realizarea unor hărți și tabele complexe, îndeosebi pentru ritmurile biologice circadiene la om, a condus la tentajia detectării unor momente optime sau, dimpotrivă, critice, ale capacității fiziologice. Variante mult simplificate ale acestor reprezentări au devenit accesibile chiar unui public larg, dornic să își evalueze zilele de performanță. Toate aceste încercări trebuie însă supuse unui filtru critic, deoarece bioritmurile reprezintă doar unul din determinanții complexului comportament psihic și fizic uman.

21.2.2. CRONOFIZIOLOGIA UMANĂ

În prezent, s-a obținut o imagine aproape completă a structurii temporale circadiene a omului sănătos în diverse circumstanțe fiziologice:

- la nou-născut, la care nu intervin restricțiile orare de repans, de activitate sau de priză alimentară și, deci, bioritmurile determinate genetic pot fi observate în starea lor „naturală”;

- la adultul sănătos sincronizat prin factorii socio-economici obișnuiți, în alternativa unei alimentații spontane sau controlate cantitativ și calitativ;

- la adultul sănătos desincronizat fie prin experimente de izolare sau sincronizator cunoscut, fie prin impunerea unui ritm socio-ecologic de 21 de ore în lumină constantă, zboruri transmeridiane pe distanțe corespunzând la cel puțin 5 fusuri orare sau observații efectuate în cursul zborurilor cosmice prelungite.

S-a constatat, în esență, că în absența unui sincronizator cunoscut perioada bioritmului se stabilizează la o valoare vecină, dar diferită, de 24 de ore, denumită perioadă naturală. Aceasta este caracteristică speciei și are o stabilitate deosebită, fiind foarte puțin sensibilă sau insensibilă la cea mai mare parte a factorilor externi (temperatură, intensitate luminoasă) și la un număr crescut de substanțe biologice active. Dimpotrivă, faza este labilă și se modifică sub acțiunea luminii, iar, în unele cazuri, sub influența temperaturii. Este, deci, suficient să se schimbe orele de iluminare și obscuritate pentru a deplasa oscilația circadiană.

Se observă, prin urmare, că ritmurile biologice prezintă anumite caractere ce diferă profund de cele ale funcțiilor fiziologice dependente de metabolism. Ele sunt insensibile la toate tipurile de inhibitori metabolici. Actinomicina D este una dintre puținele substanțe care afectează „ritmicitatea” celulară.

Deși caracteristic unei specii date, ritmurile circadiene prezintă variații chiar în cadrul aceleiași specii. Se încearcă, prin urmare, să se explice, datorită acestor variații, diferențele existente în randamentul psihic și fizic la persoanele „matinale” și „vesperale”, care prezintă vârfuri certe de activitate în una din perioadele extreme ale zilei.

Funcțiile ce prezintă bioritmuri sunt de o varietate extremă: nivelul eozinofilelor, corticosteronului, glucozei și fierului; prezența clorurilor și ureei în urină; producerea de adrenalină; activitatea fibrinolitica a plasmăi; activitatea mitotică a epidermei; presiunea internă de la nivelul globilor oculari; temperatura profundă și fluiditatea sanguină la nivelul membrelor. Această enumerare absolut incompletă ne oferă o imagine despre extrema diversitate a bioritmurilor. Este interesant că ritmurile circadiene persistă chiar în țesuturile în curs de regenerare.

S-a demonstrat coexistența independentă a mai multor mecanisme circadiene la același animal. Există, pentru același parametru, uneori un bioritm secundar asociat sistemului nervos.

În anumite condiții, oscilațiile circadiene sunt alterate în oscilații tranzitorii. Semnalele luminoase și termice pot determina apariția unor astfel de oscilații tranzitorii, care, în final, vor fi înlocuite de oscilații normale ritmului considerat, acompaniat sau nu de defazaj.

Pluralitatea bioritmurilor circadiene a condus la descrierea unei structuri temporale circadiene, care la animalele superioare este integrată și coordonată, îndeosebi prin intervenția hormonilor și a sistemului nervos. Actualmente se dezvoltă tot mai mult ideea că bioritmurile circadiene sunt rezultatul unor oscilații moleculare cuplate. În consecință, mai mulți autori au încercat să modeleze matematic și să simuleze ritmurile circadiene pornind de la o populație de oscilatori. Deocamdată nu s-a verificat direct, experimental, ipoteza pluralității oscilațiilor. Ea este totuși compatibilă cu numeroase fapte experimentale, dintre care enumerăm: sensibilitatea diferențiată a ritmurilor circadiene la anumiți factori, funcție de organism, efectele apei grele, care cresc perioada naturală a unui bioritm; la unele animale, pot fi provocate oscilații tranzitorii

prin acțiunea luminii și a temperaturii etc. Se afirmă că moleculele oscilante din care rezultă ritmurile circadiene au fost reținute în procesul evoluției datorită avantajelor selective (economie, eficacitate) pe care le oferă organismelor.

Bioritmurile cu o perioadă peste 24 de ore au fost studiate îndeosebi la plante și animale. Este cert că variațiile sezoniere ale mediului intern la animale și la om trebuie să rămână între anumite limite, compatibile cu viața. Ele exercită o serie de influențe asupra proceselor fiziologice. La om, de exemplu, în zonele temperate, presiunea arterială prezintă un maxim primăvara și un minim la sfârșitul verii. Între vară și toamnă există variații ale electroliților, compușilor azotați și 17-hidrocorticosteroidilor în urină. Temperatura internă este, de asemenea, supusă variațiilor sezoniere. Periodicitatea lunară, care a constituit multă vreme suport de fabulație, ar putea influența comportamentul uman; chiar reproducerea se pare că se supune acestei periodicități.

Deocamdată, datele cele mai certe provin din cercetarea ritmurilor circadiene. Astfel, rezultatele obținute pe subiecți sănătoși, în condiții experimentale definite, servesc ca sisteme de referință în cronotoxicologie, cronofarmacologie și cronobiologie, ramuri deja solide ale cronobiologiei umane și animale. În mod particular, cronofarmacologia circadiană corespunde, pe de o parte, la studiul efectelor medicamentelor în funcție de structura temporală (circadiană) a organismului considerat și, pe de altă parte, la studiul efectelor medicamentelor asupra anumitor bioritmuri. Rezultatele obținute în cronofarmacologie și cronoterapeutică sunt susținute de un ansamblu vast de date experimentale.

21.2.3. VARIATII FIZIOLOGICE ȘI PATOLOGICE ALE BIORITMURILOR

Asemenea majorității animalelor tinere, nou-născutul uman începe prin a fi relativ aritmic. Pe măsură ce copilul se adaptează la un ritm normal de viață, activitățile sale endocrine, temperatura, micțiunea și alte fenomene fiziologice iau tot mai mult un caracter circadian, instalându-se, de asemenea, și alte bioritmuri.

Instalarea progresivă și condiționarea bioritmurilor atrag atenția asupra celei mai mari dificultăți ce intervine în analiza acestora, necesitatea excluderii stimulilor exteriori de mediu sau de origine socială. Totuși, s-a demonstrat indubitabil că unele bioritmuri dobândite genetic persistă în condiții de izolare absolută.

În medicină, ritmurile biologice au o mare importanță potențială, deoarece ele nu sunt imuabile. De exemplu, ciclul veghe-somn poate fi modificat la lucrătorii cu program de noapte. Adaptarea nu se produce cu aceeași viteză la toți subiecții, ceea ce este un argument în plus despre existența în organism a mai multor „orologii interne”.

Perioada de timp necesară adaptării unei funcții fiziologice la un mediu nou variază de la un subiect la altul. Disocierea dintre bioritmuri este însă unul din elementele cele mai frapante ale modificării. De exemplu, la un subiect supus unui decalaj orar de 5 ore nivelul corticosteroidilor s-a adaptat în 6-8 zile, în timp ce bioritmul temperaturii s-a adaptat în mai puțin de 4 zile. Nu se cunosc încă mecanismele implicate în aceste adaptări, dar se pare că exercițiile fizice și, probabil, temperatura ridicată a mediului ambiant favorizează adaptarea. În plus, unui subiect se adaptează mai ușor într-un mediu nou, iar alții riscă să sufere un stres considerabil dacă sunt nevoiți să suporte un mediu defazat în raport cu ciclurile ritmice normale. Se poate afirma că există limite între care frecvența bioritmurilor naturale poate fi sincronizată la periodicitatea unui mediu nou. Viața contemporană obligă, uneori, oamenii să suporte temporar îndeosebi decalajele orare importante și, de aceea, devine importantă prevenirea tulburărilor fiziologice produse de aceste schimbări. Adaptarea ar putea fi facilitată adoptând cu câteva zile înaintea deplasării un ciclu veghe-somn adecvat zonei în care se va efectua călătoria. S-au propus chiar și medicamente care să favorizeze procesele de adaptare.

Faptele evocate extrem de succint probează, totuși, că reacțiile plantelor, animalelor și oamenilor la factorii fizici prezintă două aspecte esențiale distincte. Pe de o parte, ritmurile biologice sunt expresia unor caractere fiziologice dobândite ale organismelor, iar, pe de altă parte, ele pot fi modificate prin acțiunea mediului.

Interacțiunea dintre natura biologică intrinsecă a omului și a factorilor de mediu ce acționează asupra sa ne permit să ne concentrăm atenția asupra anumitor probleme de ordin fiziologic, care ar putea avea

implicații în patologie. Astfel, viața modernă a omului diferă din ce în ce mai mult de condițiile în care acesta a evoluat timp de milenii. Locuința în care se estompează diferențele de temperatură dintre sezoane, munca de noapte sau în momente diferite ale zilei, transportul la distanțe foarte mari în câteva ore, mediul social complex în ansamblul său au repercusiuni profunde asupra fiziologiei umane și nu este surprinzător ca unele din aceste schimbări să joace rol în bolile ce caracterizează viața modernă. Există deja date pentru a corela dereglările ritmurilor biologice cu alterările stării de sănătate a omului.

Cu o așteptare tot mai aprofundată a structurii temporale a organismelor întregeste imaginea proceselor fiziologice, iar, în viitor, ea va oferi încă un suport pentru explicarea științifică a unor procese patologice, dependente de factorul timp și ambianță.

21.3. TEMPERATURA CORPORALĂ ȘI MEDIUL AMBIANT

Temperatura corporală este, după cum se știe, constantă fizică a organismului viu, rezultată din reacțiile chimice celulare eliberatoare de energie indispensabilă proceselor vitale.

În timp ce reacțiile chimice implicate în asigurarea diverselor forme de activitate ale materiei vii sunt endergonice, energia necesară producerii lor este de natură exergonică, alimentară. La baza tuturor formelor de activitate celulară stau reacții enzimo-chimice de degradare a principiilor alimentare și transformare ai energiei lor potențiale în energie calorică, liberă sau stocată în legăturile macroergice ale ATP, fosfocreatinei, glicerofosfatului și acetil coenzimei A. Aproximativ 60% din energia potențială a alimentelor este eliberată sub formă de energie calorică liberă și distribuită întregului organism pe cale sașuină. Restul de 35–40% este depozitată mai ales la nivelul legăturilor fosfat ale ATP și eliberată în momentul scândării și utilizării acestuia în scop plastic, energetic sau funcțional. Astfel, toată energia rezultată din combustia celulară a nutrienților se transformă până la urmă în căldură, reflectând nivelul la care se desfășoară procesele vitale.

Ca expresie a viabilității celulare, temperatura corporală diferă de la o specie la alta. Dacă, la poikiloterme, valorile termice sunt apropiate de ale mediului de viață, la homeoterme, temperatura corporală se menține constantă indiferent de variațiile termice ale mediului înconjurător. Aceasta variază la majoritatea mamiferelor între 36 și 38°C. Ea este rezultatul intenselor procese chimice producătoare de căldură (termogeneză), contracarate în caz de depășire a valorilor normale de către fenomenele fizice de deperdiție calorică (termoliză). Căldura specifică a țesuturilor vii fiind de 0,83 calorii/kilocalorie/°C, la adultul de 70 kg sunt necesare aproximativ 58 de calorii pentru a-i crește temperatura corporală cu 1°C sau 1,8°F.

În condiții metabolice bazale, termogeneza poate atinge 60–70 de calorii pe oră, atrăgând după sine creșteri ale temperaturii corporale de 1,2°C pe oră. În efortul fizic de diferite grade, producerea de căldură poate crește pentru perioade scurte de timp până la 800–1 000 de calorii pe oră la nivelul musculaturii striate. Asemenea creșteri ar putea în pericol viața dacă nu ar interveni reacțiile compensatoare de intensificare concomitentă a pierderilor de căldură, în vederea restabilirii echilibrului termic. Grație echilibrului dinamic dintre reacțiile termogenetice sau termolitice compensatoare, temperatura corpului uman se menține în limite constante de 36,2–36,8°C la nivelul suprafeței corporale (temperatura periferică) și de 37–37,5°C la nivelul viscerelor toraco-abdominale (temperatura centrală). La copii, temperatura este ceva mai ridicată decât la vârstnici. Creșteri tranzitorii sunt posibile în funcție de ritmul diurn (valori mai mari seara decât dimineața), digestie și fluxul menstrual. Stresurile de diferite cauze și, în special, cele de cauză inflamatorie cresc temperatura corporală determinând stări febrile de etiologie foarte variată. La rândul lor, deviațiile termice ale mediului ambiant de la temperatura de confort a corpului uman (+21°C îmbrăcat și +28°C dezbrăcat) afectează mai puțin temperatura centrală decât pe cea periferică. La nivelul suprafeței corporale s-a descris o adevărată topografie termică, cu temperaturi mai ridicate la nivelul organelor implicate în termogeneza (mușchi scheletici, ficat) și mai scăzute în teritoriile care participă la reacțiile termolitice, cum sunt tegumentele feței și extremităților, căile aeriene superioare etc. Scăderi

importante, de până la 20–22°C, pot surveni la nivelul acestora fără afectarea nucleului termic toraco-abdominal. Creșterile de scurtă durată ale temperaturii tegumentelor, de până la 45°C, de asemenea, nu afectează semnificativ sectorul termic central al organismului uman. În schimb, variațiile termice mari sezoniere sau zonale determină reacții compensatoare de apărare contra frigului sau căldurii în vederea restabilirii și menținerii echilibrului termic, înotegite de rolul protector al îmbrăcăminte și locuinței. Prin straturile de aer izolator interpus între organism și mediul înconjurător, cu temperatură și umiditate variabile, acestea îndeplinesc rolul unui veritabil sistem cvasifiziologic de protecție contra variațiilor termice ale mediului ambiant. Tripleta – om, mediu, îmbrăcăminte – devine esențială în astfel de cazuri pentru menținerea stării de sănătate. Rolul principal revine mecanismelor oervoase și umorale, de autoreglare și control al temperaturii corporale.

Aceste mecanisme asigură atât temperatura corporală normală în condiții termice bazale, cât și lupta contra frigului sau căldurii în situații extreme de scăderi ale temperaturii ambiante până la –60°C sau de creșteri până la +50°C, prin reacții compensatoare de tip termogenetic sau termolitic. Din jocul echilibrat al acestora rezultă menținerea în limite constante a temperaturii centrale, indiferent, până la un punct, de variațiile termice de la nivelul suprafeței tegumentare.

21.3.1. ECHILIBRUL TERMIC

Asigurarea echilibrului termic se realizează cu ajutorul a trei categorii de factori: chimici, fizici și biologici. Primii sunt reprezentați de totalitatea factorilor implicați în reacțiile chimice celulare, consumatoare de monozaharide, aminoacizi și acizi grași, în vederea eliberării energiei lor potențiale sub formă de căldură.

Termogeneza: ca rezultat al proceselor chimice celulare, termogeneza are la bază reacții degradative oxido-reducătoare cu participarea oxigenului activat la nivel mitocondrial. Prezența oxigenului crește randamentul reacțiilor energogene celulare de la 2 molecule de ATP în condițiile glicolizei anaerobe, la 36 de molecule de ATP în cazul glicolizei aerebe.

Procesele termogenetice bazale sunt stimulate de contracția voluntară și involuntară (frisonul termic) a musculaturii scheletice, sistemul nervos adreno-simpatic, glanda tiroidă și de temperatura crescută a corpului. Creșterea activității musculare în timpul efortului fizic constituind unul din mijloacele principale de producere a căldurii, paralel cu activarea coosumului de oxigen, intensifică oxidațiile celulare eliberatoare de energie calorică. În cazul contracțiilor maxime, pot apărea creșteri de scurtă durată ale termoproducției de până la 1 000%. Sistemul nervos simpatic, deși acționează mai slab, provoacă atât stimularea termogenezei prin mecanismul eliberării și oxidării acizilor grași, cât și reducerea pierderilor de căldură, ca urmare a efectelor vasoconstrictoare periferice ale adreolinei și noradrenalinei circulante.

Pe de altă parte, hormonii tiroidieni stimulează oxidațiile biologice mitocondriale, determinând creșteri ce pot depăși 100%. Îosăși creșterea temperaturii corporale intensifică reacțiile chimice producătoare de căldură, prin același mecanism al activării enzimelor oxido-reducătoare mitocondriale. Între reacțiile chimice celulare generatoare de căldură și temperatura corporală există un *feed-back* de tipul:



Creșterea cu 1°C a temperaturii atrage după sine o creștere cu 9,8% a eliberării de energie calorică. Paralel cu creșterea temperaturii, reacțiile de deperdiție calorică sunt mai puțin eficiente. Acestea devin dominante când termogeneza exagerată ameioță echilibrul termic.

Termoliza: spre deosebire de termogeneza, termoliza se realizează prin procese fizice de conducție, convecție, iradiere și evaporare. Între procesele termogenetice chimice și cele termolitice fizice există un permaent echilibru dinamic, care înotegine temperatura corporală în limite constante (fig. 21.2).

Ca și termogeneza, termoliza depinde în mare măsură de intensitatea reacțiilor biologice. **Iradierea**, de exemplu, ca principală modalitate de pierdere a căldurii, depinde de capacitatea de emisie a suprafeței corporale și de temperatura mediului ambiant. Căldura este transferată de la suprafața

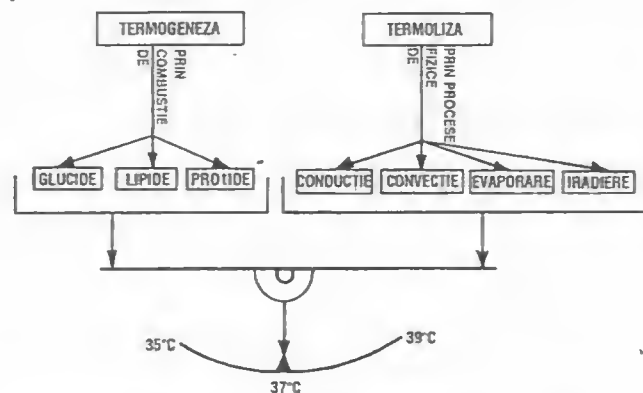


Fig. 21.2. Schema reglării termice prin procese de termogeneză și termoliză.

corpului mai cald spre obiectele mai reci din jur, fără existența unui contact fizic direct între ele, sub forma de unde electromagnetice. Pielea umană emițând radiații cu lungime de undă între 5 și 20 μm (infraroșu), acestea sunt absorbite de corpurile solide și lichide din jur. Ca orice corp prevăzut cu proprietăți emițătoare de radiații, pielea le poate și absorbi. Raportul între energia absorbită și cea radiantă apropiindu-se de 1, pielea emite și absoarbe mari cantități de căldură. În condițiile climatului temperat, un subiect sedentar îmbrăcat obișnuit poate pierde prin iradiere până la 60% din totalul deperdiției calorice, respectiv 1 200–1 400 de calorii din cele 2 400–2 500 de calorii necesare pentru 24 de ore. Pierderile sunt cu atât mai intense, cu cât suprafața radiantă și gradientul termic dintre masa corporală și obiectele din jur sunt mai mari. De aceea, copiii având suprafața corporală mai mare pierd mai ușor căldura. Din aceeași cauză, în efortul fizic predomină producerea de căldură asupra proceselor fizice de termoliză prin iradiere. Pe de altă parte, corpul uman preia căldură de la obiectele înconjurătoare cu temperatură superioară acestuia. Plasat în apropierea unei sobe calde, absoarbe până la 97% din radiațiile proiectate pe tegumente. Atât pierderea, cât și absorbția de căldură pot fi diminuate sau chiar suprimate prin izolare termică vestimentară. Eficacitatea acesteia ține de numărul straturilor izolatoare, de porozitatea și permeabilitatea la aer și vapori, precum și de conductibilitatea termică a produsului vestimentar.

Conducția realizează încălzirea sau răcirea corpului prin conducerea directă a aerului care vine în contact cu suprafața corporală. Aerul atmosferic fiind rău conducător de căldură, pierderile calorice prin conducție sunt neglijabile (3–4%). În plus, această modalitate de termoliză nu este eficace decât în cazurile de temperaturi ambiante inferioare celei de la nivelul suprafeței corporale. Excepție face doar imersia în apă, când corpul uman pierde în contact cu apa rece cantități mult mai mari de căldură, prin conducție, decât în aer. În schimb, îmbrăcămintea, fiind rău conducătoare de căldură, va determina reducerea termolizei prin conducție, convecție și iradiere.

Convecția este procesul fizic invers conducției, de deplasare, primenire și reinnoire a păturii de aer încălzit în contact cu pielea prin ventilație, de către curenții de aer, vânt sau simplă deplasare a individului. Această modalitate de transfer și înlocuire a aerului cald de la suprafața corpului cu un aer mai rece reprezintă aproximativ 12% din totalul pierderilor calorice. Curenții de aer și, mai ales, vântul intensifică termoliza prin convecție. Pierderea de căldură crescând în cazul mișcării aerului proporțional cu viteza, vântul se comportă ca o veritabilă forță de convecție. Plasarea unei păturii izolatoare (îmbrăcăminte, blană, penaj) între piele și aerul înconjurător, din contră, va reduce pierderea de căldură prin convecție. În general, convecția va fi cu atât mai intensă, cu cât diferența de temperatură între corpul uman și pătura de aer înconjurătoare va fi mai mare. Ea devine nulă la temperaturi egale și se poate chiar inversa în cazul

expunerii subiectului la temperaturi superioare celei corporale. În apă rece, pierderile calorice prin convecție sunt mai importante, ca și în cazul conducției, din cauza căldurii specifice mari a apei (1,00 față de 0,17–0,24 în cazul aerului).

Straul subcutanat de grăsime reduce pierderea de căldură și crește rezistența înotătorilor în apă rece. Prin aerul expirat pe căile respiratorii se pierde, de asemenea, o mică parte din căldura corporală. Această modalitate deține un rol important la animalele lipsite de glande sudorale. Convecția este supleată la astfel de animale de către polipneea termică.

Evaporarea apei este una din modalitățile cele mai eficace de pierdere a căldurii la om în condiții de temperaturi crescute ale mediului ambiant. În stare de repaus, ea asigură aproximativ 25% din pierderile calorice ale organismului (13% prin piele, 12% prin epiteliul pulmonar). Când temperatura mediului înconjurător depășește 35°C, evaporarea devine principalul mecanism termolitic. Pierderile de căldură prin evaporare de apă au loc atât la nivelul pielii, prevăzută la om cu 2,5–3 milioane de glande sudoripare, cât și prin mucoasele căilor respiratorii și buco-faringiene, care saturează aerul expirat cu vapori de apă.

În condiții bazale de repaus, activitatea secretorie a glandelor sudoripare este redusă și limitată la mici cantități de sudoare ce se evaporă pe măsura producerii sale, asigurând împreună cu glandele sebacee aspectul normal al pielii. În afara secreției sudorale, mici cantități de apă (300–400 ml) se pierd prin piele sub formă de perspirație insensibilă. Aceasta crește în condițiile aerului cald sau ale temperaturii corporale peste valorile normale (fig. 21.3).

Evaporarea este cu atât mai intensă, cu cât temperatura mediului înconjurător este mai ridicată. Creșterea temperaturii corporale, efortul fizic, emoțiile și stările de încordare neuro-psihică, în general, intensifică, de asemenea, secreția sudorală și pierderile de căldură prin evaporarea de apă. În timpul eforturilor fizice intense efectuate la temperaturi înalte de către oțelari, furnaliști, cazangii, turnători etc., se pot pierde cantități mari de apă sub formă de transpirație și, odată cu aceasta, mari cantități de căldură, întrucât, odată cu evaporarea a 1 ml de apă, se pierd 0,58–0,60 calorii.

Valoarea termolitică a secreției sudorale depinde atât de temperatura mediului înconjurător, cât și de gradul său de saturare cu vapori de apă; în mediul cald și saturat cu vapori de apă, vaporizarea nu se mai produce, iar pierderea de căldură pe această cale încetează. De aceea, căldura umedă este mai greu suportată decât cea uscată. Mișcarea aerului întregeste condițiile favorabile de evaporare ale climatului cald și uscat. În afara factorilor biologici și climatici menționați, termoliza este influențată de intensitatea irigației cutanate, care poate crește de la 5% până la 30%, îndeplinind rolul unui adevărat radiator reglabil. La rândul său, intensitatea circulației în capilarele tegumentare depinde de deplasarea sângelui de la nivelul nucleului central la mantaua cutanată periferică. În funcție de cantitatea de sânge ajunsă la nivelul suprafeței corporale, pierderea de căldură va fi mai mare sau mai mică.

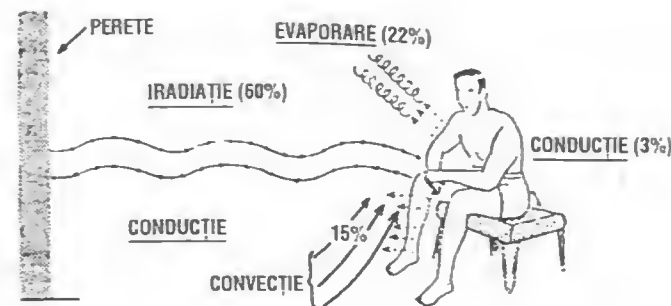


Fig. 21.3. Mecanisme fizice de pierdere a căldurii.

21.3.2. REGLAREA TEMPERATURII CORPORALE

Sensul și amploarea reacțiilor vasculare termolitice sunt, ca și în cazul proceselor metabolice termogenetice, sub controlul permanent al sistemului neuro-endocrin. Acesta reglează pe cale reflexă și ajustează la necesități atât mecanismele chimice producătoare de căldură, cât și pe cele fizice de deperdiție calorică, cu participarea creierului, măduvei spinării și glandelor cu secreție internă. Funcționând ca un termostat reglabil, organismul uman reacționează atât la variațiile termice exogene, cât și la dereglările de cauză endogenă ale temperaturii centrale în două principale moduri: voluntar și reflex.

Prima modalitate o constituie reacțiile conștiente și activitățile comportamentale care urmăresc minimalizarea variațiilor termice ale mediului prin acțiuni voluntare, de tipul deplasării de la un climat la altul, utilizarea diverselor surse de încălzire sau răcire, climatizarea aerului din locuințe, îmbrăcăminte adecvată etc. Deși reduc influențele brutale ale temperaturii ambiante, aceste reacții comportamentale nu sunt suficiente pentru a asigura echilibrul termic la om. De aceea a apărut necesitatea intervenției mecanismelor de autoreglare reflexă, ca modalitate fundamentală de reglare a temperaturii corporale. Aceasta este o achiziție mai recentă în scara filogenetică, prezentă numai la păsări și mamifere. La om, în lipsa blănii și a penajului, s-a dezvoltat și perfecționat un mecanism complex de termoreglare, care permite modificări mici (de sub 1°C) ale temperaturii centrale, în ciuda marilor variații termice ale mediului înconjurător.

Dintre factorii climatici care solicită procesele reflexe termoreglatoare, mai importanți sunt: temperatura, umiditatea și mișcarea aerului, precum și temperatura corpurilor solide sau lichide înconjurătoare. În timp ce umiditatea crescută limitează deperdiția de căldură prin evaporare, vântul rece o intensifică. Orice factor exogen sau endogen care amenință echilibrul caloric determină din partea organismului reacții compensatoare neuro-endocrino-metabolice de o mare precizie, în vederea restabilirii balanței termice și menținerii sale în limite constante normale.

Ca orice act reflex, reacțiile termogenetice sau termolitice compensatoare au la bază arcuri reflexe complexe, formate din termoreceptori periferici și centrali, căi nervoase aferente, centri termoreglatori și căi eferente somato-vegetativo-endocrine. În esență, este vorba de stimularea predominant directă sau reflexă a centrilor termogenetici din hipotalamusul posterior sau a centrilor termolitici din hipotalamusul anterior (fig. 21.4), urmată de reacții producătoare sau de pierdere a energiei calorice pe trei căi principale: somatică, vegetativă și endocrină.

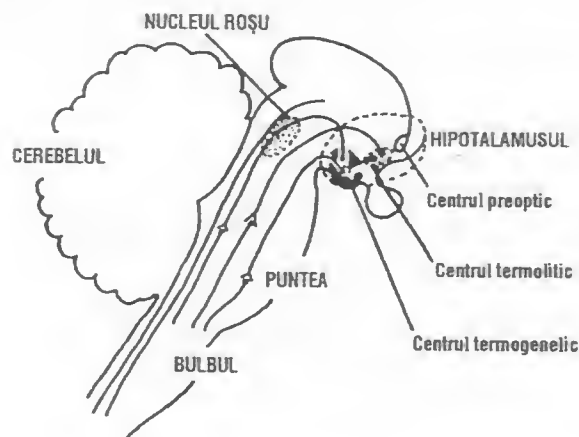


Fig. 21.4 Centrii termogenetici și termolitici hipotalamici.

Reacțiile somatice sunt reprezentate de modificările tonusului și contractilității musculare. Frigul, de exemplu, provoacă într-un prim moment creșterea tonusului muscular, urmată de contracții musculare involuntare, sub formă de frison, ca modalități de intensificare a proceselor termogenetice. Frisonul termic se produce ca urmare a excitării neuronilor motori medulari de către nucleul roșu din mezencefal, stimulată, la rândul său, de centrii termogenetici din hipotalamusul posterior. Pe această cale, contracțiile musculare din frisonul termic realizează în scurt timp creșterea temperaturii corporale cu 3–4°C. Activitatea musculară voluntară este cea de-a doua manifestare somatică care contribuie la activarea proceselor termogenetice generatoare de căldură.

Componenta vegetativă realizează adaptarea circulației pielii și secreției sudorale la necesitățile locale și generale ale termoreglării. Pierderea de căldură prin procesele fizice de conducție, convecție, iradiere și evaporare este direct proporțională cu fluxul sanguin cutanat. De intensitatea reacțiilor vasomotorii la nivelul pielii depind atât aportul de căldură la suprafața corpului, cât și secreția sudorală. Fenomenele de predominanță simpatică provocate de frig, ca urmare a stimulării reflexe a centrilor termogenetici din hipotalamusul posterior, reduc, prin vasoconstricția periferică, aportul de sânge la periferie și pierderile de căldură prin conducție, convecție și, mai ales, iradiere (fig. 21.5).

Creșterea rezistenței vasculare cutanate stă la baza reacției presoare produse de „testul presor la rece”.

Când temperatura unei zone cutanate limitate scade sub +15°C, constricția inițială a vaselor este urmată de vasodilatație paradoxală, ca mecanism local de protecție tisulară contra pericolului de răcire excesivă și ischemiere a teritoriului respectiv.

La rândul lor, reacțiile parasimpatice induse de excitarea centrilor termolitici din hipotalamusul anterior determină vasodilatație și secreție sudorală, în vederea intensificării proceselor fizice de deperdiție a căldurii prin iradiere și, respectiv, evaporare. Debitul sanguin cutanat crește de la 12–15 ml până la 50 sau chiar 100 ml/min/100 g piele.

Veriga endocrină participă mai ales la producerea reacțiilor termogenetice determinate de frig prin intermediul complexului hipotalamo-hipofizar, al glandelor suprarenale și tiroidei, subordonate acestuia.

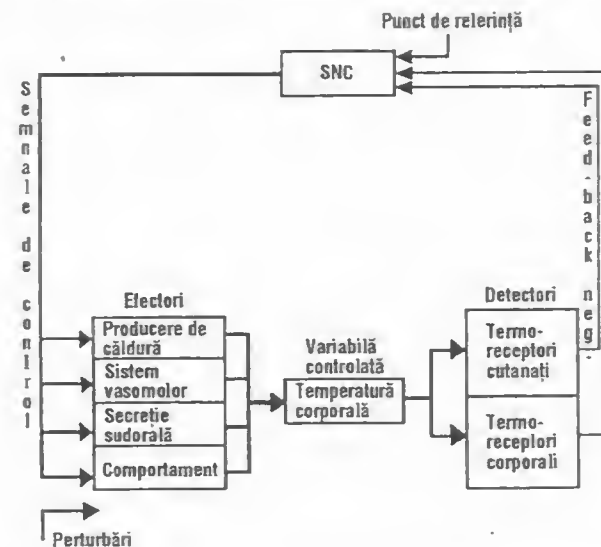


Fig. 21.5. Autoreglarea temperaturii corporale prin reacții compensatoare de feed-back.

Frigul activează atât secreția de hormoni tiroidieni și corticopurarenali, cât și de adrenalina medulosuprarenală. În timp ce hormonii tiroidieni și adrenalina intensifică termogeneza și diminuează termoliza, hormonii glucocorticoizi activează reacțiile chimice de gluconeogeneză necesare producerii de căldură. Astfel, efectele prompte ale reglării nervoase sunt potențate și prelunțate în timp de componenta hormonală, în funcție de necesitățile reglării termice.

Cunoașterea *mecanismelor de adaptare la frig* a constituit subiectul a numeroase studii efectuate fie pe modele animale (cel mai frecvent pe șobolanul de laborator) sau, în cadrul unei expediții, pe populații umane expuse în mod natural la frig în Arcica, Antarctica, Australia și deșertul Kalahari. La animalele menținute mai multe săptămâni la temperaturi sub 5°C este caracteristică o creștere a secreției de adrenalina și noradrenalina. Cortexul suprarenal este stimulat consecutiv stresului provocat de scăderea în greutate și de tremurături. Concentrația plasmatică a noradrenalinei rămâne crescută pe toată durata menținerii în condiții de frig. S-a demonstrat că la șobolanii menținuți în frig câteva săptămâni, tremurăturile încetează când animalele prezintă o temperatură internă normală. Acest proces este consecința creșterii capacității termogenetice a țesutului adipos brun, mediată de sistemul nervos simpatic. Prin injectarea zilnică de noradrenalina la animalele neexpuse la frig se creează o rezistență a acestora la temperaturi scăzute, fapt care probează rolul sistemului nervos simpatic în adaptarea la frig.

O serie de cercetări recente pot avea implicații în cunoașterea procesului adaptării la frig. Astfel, cultivând *in vitro* celule de mamifere, acestea devin foarte rezistente la frig dacă sunt expuse în prealabil, pentru o perioadă scurtă de timp, la temperaturi crescute (până la 41°C). În producerea acestei rezistențe sunt implicate proteinele de șoc termic (*heat shock proteins*), în mod particular proteina de 70 kDa. Creșterea sintezei acestor proteine constituie un răspuns nespecific, de stres, deoarece a fost observată ca o consecință a unor agenți stresanți diverși ca, de exemplu, hipoxia.

Datele obținute pe animale sau pe culturi de țesuturi pot fi utile în explicarea mecanismelor de adaptare la mediu hipotermic ale omului, expus la frig din cauza climei, ori din motive profesionale. Declanșarea activării țesutului adipos brun sub acțiunea frigului nu a fost însă demonstrată. Activarea este discretă sau lipsește, probabil și datorită faptului că expunerea la frig trebuie să aibă o durată suficientă. De aceea, s-a sugerat că, la om, diminuarea disconfortului și a tremurăturilor este indusă și de obișnuință (*habitation*), care este controlată central printr-un reflex condiționat negativ. Se afirmă că dacă organismul este expus la frig moderat, pentru perioade variate de timp, „învață” că situația nu este periculoasă. Experimental, s-a demonstrat că o creștere a temperaturii în vecinătatea măduvei spinării, în particular la nivelul țesutului brun interscapular, previne activarea receptorilor spinali pentru frig și abolește tremurăturile. Rezultă că, prin termogeneza crescută, țesutul adipos brun ar bloca stimularea la frig a receptorilor spinali.

21.3.3. FACTORII DE APĂRARE CONTRA FRIGULUI ȘI CĂLDURII

Atât menținerea temperaturii corporale normale, cât și lupta contra frigului sau căldurii se realizează prin reacții neuro-endocrine-metabolice conjugate, de creștere sau scădere a producerii de căldură, întregite de ajustări corespunzătoare ale pierderilor calorice.

Dintre factorii climatici producători de asemenea reacții indispensabile termoreglării fac parte:

- temperatura mediului ambiant superioară sau inferioară celei de confort termic, ca stimulant al termoreceptorilor cutanați la cald și rece;
- umiditatea aerului, ca factor ce limitează deperdiția de căldură prin evaporare;
- viteza vântului, ca factor de primenire a păturii de aer la suprafața corpului și de intensificare a pierderilor de căldură prin evaporare;
- temperatura corpului înconjurătoare, ca factor de intensificare a pierderilor sau captării de căldură.

Tendința la scădere a temperaturii nucleului central al corpului uman determinată de frig sau de reducerea proceselor termogenetice este contracarată prin reacții neuro-reflexe inverse, de intensificare a termoproducerii dublate de inhibarea reacțiilor termolitice.

În general, organismul se apără contra frigului prin:

- vasoconstricție în teritoriul cutanat, pentru a reduce pierderile calorice prin iradiere, conducție și convecție;

- scăderea secreției sudorale, în vederea diminuării pierderii de căldură prin evaporare și conservării sale la nivelul nucleului termic central al organismului;
- activarea proceselor metabolice celulare pe cale nervoasă (frisonul termic, activitatea musculară voluntară) și endocrină, ca principale modalități de intensificare a reacțiilor termogenetice;
- ingestia de alimente calorice (băuturi calde, bogate în hidrocarbonate, grăsimi etc.);
- participarea paniculului adipos subcutanat, rău conducător de căldură, cu rol de manta biologică;
- participarea îmbrăcăminte și a încălziminte, ca sisteme vestimentare protectoare contra pierderilor de căldură endogenă.

Dacă îmbrăcăminte obișnuită reduce la jumătate deperdiția calorică a subiectului dezbrăcat, aceasta scade de 6 ori în cazul unui costum arctic. Umezeala compromite rolul protector al îmbrăcăminte și încălziminte. Locul stratului izolator de aer fiind luat de apă, prevăzută cu conductibilitate mare pentru căldură, pierderile calorice cresc de aproape 20 de ori. De aceea, îmbrăcăminte și încălziminte umede sau îmbibate cu transpirație își pierd capacitatea protectoare contra pierderilor de căldură.

La rândul său, tendința de creștere a temperaturii corporale produsă de temperatura ridicată a mediului ambiant sau de către termoproducția crescută, determină reacții de sens invers celor care au provocat-o. Acestea sunt reprezentate de:

- vasodilatație periferică, activatoare a pierderii de căldură prin iradiere, convecție și conducție cutanată;
- sudare și evaporare crescută;
- termogeneza redusă, realizată prin diminuarea activității musculare până la repaus total;
- reducerea ingestiei de alimente calorice și folosirea de băuturi reci;
- răcirea mediului ambiant și primenirea păturii de aer în contact cu pielea prin ventilație;
- îmbrăcăminte sumară pentru a reduce reținerea de căldură.

Un rol modest revine polipneei termice la om.

Rezultă că atât lupta contra frigului, cât și reacțiile de apărare contra căldurii soliciită ambele procese termoreglatoare.

Frigul activează reacțiile termogenetice și, concomitent, inhibă procesele termolitice și, invers, căldura intensifică termoliza și inhibă termogeneza.

Intensitatea și durata ambelor procese termoreglatoare depinde atât de capacitatea de autoreglare termică a organismului, cât și de calitatea îmbrăcăminte și încălziminte, cu rol de veritabil sistem cvasifiziologic.

21.4. EFECTELE FIZIOLOGICE ALE ALTITUDINII

Termenul de altitudine se referă la distanța pe verticală măsurată în metri, în raport cu nivelul mării. Principala modificare luată în considerare, ca urmare a creșterii altitudinii, este diminuarea presiunii atmosferice. De la 760 mm coloană mercur, sau 1013 hPa (valoare care, conform noului sistem internațional de unități de măsură, trebuie convertită în kilopascali – kPa, prin multiplicarea cu un factor de conversie de 0,1333). Față de nivelul mării, presiunea atmosferică diminuează pe măsura creșterii altitudinii. Astfel, la 3 000 de metri, altitudinea scade la 550 mmHg, consecutiv diminuării concentrației oxigenului (21% din aer) de la 159 mm, la nivelul mării, la numai 110 mm, la 3 000 m altitudine. Scăderea presiunii atmosferice în funcție de creșterea altitudinii nu este liniară și convențional se consideră că la fiecare 6 000 de metri ea se reduce la jumătate. Se poate admite o depresiune de circa 1 mmHg pentru 10 m altitudine, dar această scădere este tot mai redusă pe măsura creșterii altitudinii. Frecvent, se ia în considerație, pentru caracterizarea efectului altitudinii asupra organismului uman, în mod simplist, doar faptul că scăderea presiunii aerului, respectiv a oxigenului, antrenează o creștere a schimburilor gazoase între aerul ambiant și plămâni. În realitate, la altitudini importante se modifică, concomitent cu presiunea atmosferică, și alți factori ce nu trebuie ignorați: temperatura, curenții de aer, radiațiile, umiditatea aerului etc. Dispariția vegetației de la o anumită înălțime nu este consecința factorului barometric, ci a scăderii temperaturii.

Pe de altă parte, viața la altitudini mari este condiționată de o serie de proprietăți particulare ale atmosferei, dar și de caracteristicile terenului, care obligă la eforturi fizice deosebite. Obosala fizică va rezulta din interacțiunea terenului și a factorilor atmosferici, îndeosebi reducerea presiunii oxigenului, solicitând mecanismele homeostazice ale organismului și având drept consecință realizarea, uneori, a unor adaptări remarcabile.

Viața animală aeriană este adaptată la majoritatea cazurilor unor presiuni barometrice cuprinse între 760 și 600 mmHg (0–100 m), totuși mai mult de 10 milioane de oameni trăiesc la altitudini de circa 4 000 m, iar viața există și pe Everest, la peste 8 000 m. Satul Cero de Pasco din Bolivia se află la 5 000 de metri altitudine și țăranii acestei colectivități sunt perfect adaptați. Mai multe civilizații străvechi s-au dezvoltat la altitudini importante, îndeosebi în zona de Nord a Americii de Sud. În prezent, există populații ce prezintă un nomadism ciclic: țăranii aborigeni instalați la periferiile marilor orașe din America de Sud revin la altitudine în momentul strângerii recoltei, adaptarea pe care o posedă permijându-le reintegrarea episodică în mediul ecologic pe care l-au abandonat. Raportul oamenilor din Aozii Cordilieri cu mediul este foarte strâns, la înălțimile respective existând în flora spontană plantele cele mai bogate în fier, ce contribuie la creșterea conținutului de hemoglobină din sânge.

În esență, modificările fiziologice produse de altitudine trebuie descrise luând în considerație două alternative: (a) *expunerea acută* a organismului la înălțimi mari; (b) *expunerea cronică* consecutivă locuirii un timp îndelungat la altitudine mare. Pentru prima alternativă se preferă studiile experimentale în laborator, în timp ce în cazul expunerii cronice datele cele mai importante se obțin prin investigarea populațiilor umane care au trăit sau mai trăiesc încă la înălțimi mari, în diferite zone ale globului.

21.4.1. EFECTELE EXPUNERII ACUTE

În cazul expunerii acute, fenomenele care apar sunt definite cu expresia comună „rău de altitudine”, exprimate subiectiv prin cefalee, greață, astenie, somnolență, modificări ale respirației și circulației, iar, dacă ascensiunea continuă, chiar sincopă și moarte. Există o mare variabilitate individuală, ce depinde de adaptare, de efortul fizic, de starea fizică, temperatura ambiantă etc. Deoarece ascensiunile pe munți se efectuează, de obicei, prin purtarea în spate a unei greutăți de 10–15 kg, fenomenele de rău de munte apar mai repede decât răul de avion, unde nu se depune efort fizic. Curios este faptul că răul de munte apare, de exemplu, în Alpi, la o altitudine mai joasă decât în Anzii Cordilieri sau Himalaia, fenomen corelat parțial cu limita zăpezilor continue. În general, omul și animalele suportă mai ușor creșterea presiunii decât reducerea acesteia.

Rezultatul fiziologic unic al expunerii la mare altitudine este hipoxia, ce va crea un deficit de energie, parțial limitat prin creșterea în organism a producției pe calea metabolismului anaerob. Mecanismele homeostazice ale organismului intervin pentru corectarea hipoxiei, combaterea acesteia realizându-se prin modificări respiratorii, cardio-vasculare, sanguine, urinare, ale forței musculare, ale termogenezei, reacții psihice și senzoriale.

Modificările respiratorii constau în creșterea ventilației pulmonare, prioritar mărirea frecvenței respirației. E. Pora observă că la ieșirea respirația este polipneică până la o depresiune barometrică echivalentă cu cea de la 9 000 m altitudine, pentru ca apoi să devină oligopneică. Odată cu creșterea frecvenței respiratorii, capacitatea vitală scade, din cauza ridicării diafragmului în urma destinderii gazelor intestinale. Ca urmare, debitul respirator nu se modifică prea mult. În literatură se confirmă o creștere sistematică a aerului respirator, dar, în ceea ce privește capacitatea vitală, datele sunt contradictorii.

În cadrul modificărilor cardio-vasculare este certă tahicardia însoțită de o mărire a presiunii arteriale sistolice și diastolice. Se accentuează circulația periferică, atât prin dilatarea capilarelor, cât și prin deschiderea unor capilare de rezervă.

Viteza sângelui în capilare poate scădea, favorizându-se astfel oxigenarea tisulară. S-a pus în evidență o redistribuție a fluxului sanguin ce favorizează creierul și inima.

Modificările sanguine se exprimă în primul rând prin creșterea numărului de eritrocite, detectabilă chiar și în urma unei ascensiuni de câteva ore. Aceasta este consecința eliberării hematiilor din rezervele organismului și a unei deshidratări paralele a sângelui, dar nu durează decât câteva zile după revenirea la

joasă altitudine. O hiperglobulie adevărată și stabilă presupune accelerarea hematopoiezei, posibilă doar în câteva săptămâni. În consecință, poliglobuliile se constată la subiecții adaptați după rămânerea un timp îndelungat la altitudini crescute.

Ca urmare a rarefieri aerului, deși oxigenul se află tot în proporție de 21% în aerul total la o înălțime de 250 m și o presiune atmosferică de 650 mmHg, presiunea oxigenului este de numai 136 mmHg; la 2 750 m și o presiune barometrică de 550, presiunea O_2 este de numai 115 mmHg, pe când la 4 170 m înălțime și o presiune de 450 mmHg, tensiunea oxigenului scade la numai 94 mmHg. Deoarece saturarea hemoglobinei cu oxigen depinde de presiunea oxigenului în aerul inspirat, rezultă că, proporțional cu creșterea înălțimii la care se află organismul, scade cantitatea de oxihemoglobină. În consecință, ca o reacție homeostatică imediată, se produce mobilizarea globulelor roșii din organele de rezervă, mărindu-se astfel cantitatea de oxigen fixată. La o depresiune atmosferică avansată, cantitatea necesară de oxigen nu se mai poate fixa nici prin acest mecanism și, ca urmare, apar fenomenele de hipoxie sau asfixie, care determină simptomatologia răului de altitudine. O adaptare, pusă în evidență recent, constă în modificarea porțiunii abrupte a curbei de disociere a oxihemoglobinei, favorizându-se astfel eliberarea oxigenului la nivelul capilarelor.

Prin eliminarea mai intensă de CO_2 , deși tendința de alcalinizare a sângelui este compensată prin creșterea hemoglobinei și a cantității de oxigen fixat de sânge, pH-ul sanguin este ușor alcalin. La altitudine, consumul de oxigen la nivel tisular scade, îndeosebi dacă se depune și un efort. De exemplu, la 2 900 m consumul de oxigen se reduce cu 16–36%, iar la 3 600 m, cu 35–67%, în raport cu consumul de la 275 m (după Forrer, citat de E. Pora). În aceste condiții, cu toate mecanismele de adaptare, se ajunge la o hipoxie progresivă.

Modificările de la nivelul aparatului excretor nu sunt bine cunoscute și depind de celelalte variații: oligurie, consecutiv transpirației accentuate, glicozurie, ca urmare a hiperglicemiei. Ele depind de regimul alimentar al subiectului.

Capacitatea de efort muscular scade cu altitudinea. Modificările termogenezei constituie subiect de controverse, acceptându-se, în general, că lipsa de oxigen, prin polipneea consecutivă, crește evaporarea la nivelul tractului respirator, la care se adaugă transpirația, precum și temperatura redusă a mediului ambiant la altitudini mari.

Efectele hipoxiei asupra sistemului nervos se exprimă la nivelul creierului pe plan psihic (intelectual și comportamental), senzorial, motor, iar în hipoxia severă are loc o afectare a funcțiilor măduvei spinării și a nervilor periferici. Barcroft compară efectele hipoxiei acute cu cele ale intoxicației alcoolice. Starea de euforie acompaniată de o satisfacție exagerată reprezintă efectul insidios al hipoxiei, explicat probabil prin reducerea controlului scoarței asupra centrilor subcorticali. Reducerea discernământului critic și a inițiativei reprezintă cea mai caracteristică manifestare cerebrală a hipoxiei. Memoria pe termen scurt este afectată și această perturbare a memorizării evenimentelor recente a dus la supoziția unei similitudini cu alterările consecutive reducerii fluxului sanguin cerebral la vârstnici.

Efectele hipoxiei la nivelul organelor senzoriale sunt foarte variate. Sensibilitatea la lumină este prima funcție fiziologică a cărei reducere se obiectivează cu creșterea altitudinii. Alte tulburări vizuale induse de hipoxie constau în scăderea capacității de apreciere a distanțelor, afectarea câmpului vizual, a acomodării și convergenței. Acțiunea hipoxiei s-ar exercita asupra proceselor fotochimice retinice, la nivelul sinapselor retinene, ca și în centrii corticale de proiecție a căilor vizuale. Tulburările vizuale devin obiectivabile de la o înălțime de 2 000 m.

Comparativ, funcția auditivă este mai rezistentă, constatându-se o reducere moderată a acuității auditive abia la altitudini de peste 4 000 m. Modul de acțiune a hipoxiei în acest caz nu este clarificat. Informațiile reduse referitoare la alte funcții senzoriale probează o afectare nesemnificativă a acestora.

Perturbări ale controlului neuro-muscular, exprimate prin tremurături și creștere a răspunsurilor reflexe clasice, apar la peste 3 000 m, interpretate ca o creștere a excitabilității neuro-musculare asociată cu alcaloza produsă prin hiperventilație. La depresiuni corespunzătoare unor altitudini de peste 6 500 m, tulburările se accentuează, astfel încât, la animalele de laborator apar, la altitudini simulate de peste 13 000 m, convulsii tonico-clonice. Cauza acestor convulsii nu este clară, presupunându-se că deficitul hipoxic accentuat de la nivel cerebral provoacă alterări ale depolarizării membranelor neuronale, cu o descărcare neuronală intensă, comparabile cu cele din șocul electroconvulsiv și medicamentos prin fenitretazol (metrazol).

Efectele hipoxiei de altitudine se exprimă și la nivelul sistemului nervos autonom, ceea ce explică unele tulburări de la nivelul traciului gastro-intestinal și de la nivel renal.

Există și un *răspuns patologic* în expunerea acută la altitudine, exprimat prin răul acut de munte, caracterizat printr-o mare variabilitate de simptome. Cel mai frecvent el se exprimă prin cefalee, anorexie, greață, vomă, dispnee și insomnie, la care se pot adăuga o sensibilitate crescută la frig, vertije, palpitații, inabilitate de concentrare, alterări ale discernământului, dureri toracice, rinoree și o varietate de tulburări neurologice.

Rapiditatea apariției simptomelor variază cu rata de ascensiune, altitudinea atinsă (uneori chiar sub 2 000 m), precum și cu variabilitatea individuală. Patogeneza răului acut de munte rămâne obscură, fiind din nou invocate hipoxia și alcaloza produsă prin hiperventilație. Un accident major îl reprezintă edemul pulmonar acut, descris inițial ca o pneumonie. Studii clinice și experimentale recente explică procesul patologic ca o consecință a creșterii presiunii capilare pulmonare și a permeabilității capilare de la acest nivel, ceea ce provoacă trecerea intraalveolară a proteinelor plasmatice. Fenomenul debutează prin asocierea hipoxiei cu o creștere a volumului de sânge intrapulmonar însojită de vasoconstricție pulmonară.

21.4.2. EFECTELE EXPUNERII CRONICE

Expunerea cronică la altitudine conduce la mecanisme de adaptare remarcabile. Pentru diferențierea adaptării organismului la diferiți factori de mediu s-a propus o disjuncție de termeni. Astfel, cuvântul aclimatizare este utilizat cu referire la adaptarea la mai mulți factori de mediu (presiune barometrică, frig, secetă, radiații etc.), pentru ca termenul *acimatare* să se refere la reglarea homeostaziei, la un anumit factor de mediu (de exemplu, scăderea presiunii oxigenului). *Adaptarea* definește modificările genetice produse la generații succesive de organisme expuse la medii cu factori particulari modificați și perpetuate prin selecție naturală.

La începutul acestui capitol am menționat câteva exemple remarcabile de adaptare la altitudine. Multă vreme, fenomenul cercetat aproape exclusiv în acest caz a fost poliglobulia. Astfel, Viault, prin autoobservație, a constatat că în timp ce la Lima (țărâmul Pacificului) avea 5 000 000 de hematii pe mm³, la 30 de zile după o ascensiune în zona lacului Titicaca (6 550 m) avea în sânge un număr de 8 000 000 de eritrocite pe mm³. În realitate, adaptarea la altitudine mare este un fenomen mult mai amplu și, de aceea, vom examina succint ansamblul de modificări homeostazice produse în acest caz.

La nivelul aparatului respirator, fenomenul major constă în creșterea presiunii alveolare a O₂ și reducerea aceleiași presiuni în cazul CO₂, rezultând astfel o creștere a conținutului în O₂ în sângele arterial.

La nivelul aparatului cardio-vascular, tahicardia inițială dispare în câteva luni, apoi se produce o adaptare comparabilă cu cea din efortul fizic, exprimată prin creșterea presiunii în arterele pulmonare și un grad de hipertrofie ventriculară dreaptă; la nivelul sângelui, în afara poliglobuliei, se constată o creștere a concentrației hemoglobinei, prin scăderea volumului plasmatic și fără modificări de volum ale globulelor roșii. Persistă modificarea curbei de disociere a oxihemoglobinei, menționată anterior în cazul expunerii acute. S-a mai relevat și o creștere a producției de eritropoietină renală, cu stimularea consecutivă a măduvei hematogene, rezultând în final o mărire a hematocritului. Ca urmare, se produce o creștere a vâscozității sângelui, iar, compensator, deoarece circulația oxigenului în acest caz este obstrucționată, crește densitatea capilarelor în numeroase organe și, în primul rând, la nivelul creierului, inimii și mușchilor scheletici. Factorii hemodinamici devin, astfel, un element important în adaptarea la mare altitudine.

Modificările mai subtile, celulare, sunt subiectul unor puternice controverse, rezultatele discordante explicându-se și prin neuniformitatea metodelor de cercetare utilizate. Barbașova este unul din cei mai convinși susținători ai faptului că singurele modificări de la nivelul sistemelor respirator, cardio-vascular și de la nivelul sângelui nu pot explica adaptarea organismului la înălțimi mari. Ea împarte, de aceea, mecanismele adaptative în două categorii:

- a) „lupta pentru oxigen”, exprimată prin modificări celulare, cum ar fi creșterea concentrației de mioglobină și a activității enzimelor oxidative;
- b) „adaptarea la hipoxie”, în care se includ scăderea consumului celular de oxigen, creșterea producției de energie prin glicoliză anaerobă și o „creștere a rezistenței Jesuturilor” nespecifice.

Adaptarea celulară implică, deci, intervenția a trei factori: mioglobină, metabolismul aerob și metabolismul anaerob. Datele obținute până în prezent în acest sens nu sunt complete, dar se întrevide că modificările celulare reprezintă un determinant major al tipului de adaptare pe care îl prezentăm.

Studii interesante au fost efectuate prin urmărirea evoluției adaptării la altitudine a descendenților din părinți deja adaptați, comparativ cu subiecți descendenți din părinți care au trăit în regiunile de șes. Prin urmărirea celui mai reproductibil indice al capacității metabolismului aerob, captarea maximă de CO₂ pe minut, s-a constatat creșterea semnificativă a acestuia doar la cel de-al doilea lot. Alte probe experimentale demonstrează existența unor modificări vasculare și a adaptării celulare la persoanele care, deși locuiesc în zone cu altitudine redusă, beneficiază de o adaptare rapidă la înălțime, ca urmare a unor caracteristici transmise ereditar.

Devenită o problemă de cercetare importantă, ca urmare a evoluției demografice, adaptarea la altitudini mari conține încă multe necunoscute, îndeosebi la nivel celular și subcelular.

21.5. DATE ACTUALE DE FIZIOLOGIE AEROSPAȚIALĂ

Aspirația din totdeauna a omului de a cunoaște cosmosul, exprimată în celebrele mituri ale lui Icar și Dedal, este în curs de realizare, cu toate dificultățile sale. De la primul zbor spațial al omului, la 12 aprilie 1961, au urmat altele, iar primii pași ai omului pe lună, la 21 iulie 1969, au deschis o nouă etapă în cucerirea spațiului cosmic. Reușita acestor expediții a fost rezultatul unui număr considerabil de lucrări preparatorii efectuate în laboratoare sau în spațiu. S-a demonstrat, astfel, posibilitatea supraviețuirii organismelor într-un mediu cu factori ce diferă radical față de condițiile de viață de pe pământ. Concomitent, ca urmare a efortului tehnologic de mare anvergură, s-au obținut progrese de mare interes în mai multe domenii ale științelor și, în mod particular, în fiziologie și medicină, cu unele repercusiuni neprevăzute chiar la nivelul cercetării fundamentale. În ceea ce privește zborurile în atmosferă, ele au devenit o realitate cotidiană, în competiție cu celelalte mijloace de transport.

Din toate acestea decurge interesul larg al datelor de fiziologie, uneori la frontiera cu fiziopatologia – îndeosebi în cazul zborurilor cosmice, referitoare la comportarea organismului uman în cazul deplasării sale prin intermediul unor vehicule, la altitudini importante. În continuare, vom dezvolta următoarele aspecte:

- date sintetice asupra atmosferei terestre;
- probleme de fiziologie ale zborului în atmosferă;
- aspecte actuale de fiziologie și fiziopatologie cosmonautică.

21.5.1. DATE SINTETICE ASUPRA ATMOSFEREI TERESTRE

Prin denumirea de atmosferă se desemnează învelișul alcătuit din gaze (în cea mai mare parte) și vapori care înconjură globul terestru. Atmosfera este un fluid în mișcare, ca urmare ea poate fi descrisă după legile mecanicii fluidelor și ale termodinamicii ce permit studiul mișcărilor atmosferice și, într-o oarecare măsură, evoluția sa. Ansamblul constituit din globul terestru și atmosferă se comportă asemenea unei mașini termice complexe, ce posedă surse calde și surse reci, între care temperatura variază continuu. Într-o primă aproximație, se poate admite că o sursă caldă unică se află între tropice, fiecare regiune polară constituind o sursă rece. Mișcările atmosferei asigură schimburi termice între aceste zone. Ele asigură astfel un anumit echilibru, limitând variațiile de temperatură funcție de sezoane și de succesiunea zi-noapte. Atmosfera terestră, indispensabilă prin ea însăși vieții animale și vegetale, intervine și prin această continuă variație, solicitând mereu mecanismele homeostazice ale organismului.

Frontiera atmosferei „omogene” se situează la circa 8 km de suprafața pământului. Componentele atmosferei, gaze și vapori, sunt menținute datorită forței de atracție gravitațională a pământului. Deoarece forța de gravitație descreește cu pătratul distanței față de centrul pământului, densitatea atmosferei, din care rezultă presiunea atmosferică, descreește după o curbă exponențială. La aproximativ 5,5 km, presiunea se

reduce la jumătate față de nivelul mării, la 11 km – la un sfert, iar la 32 km devine abia 1/100 din aceasta. În ciuda acestei scăderi importante a presiunii, actualmente se consideră că atmosfera există ca un strat continuu până la înălțimea de 1 000 km. În funcție de o serie de criterii fizice, atmosfera prezintă trei mari subdiviziuni: (1) *troposfera*, extinsă până la aproximativ 10 km de suprafața terestră, cu variații dependente de sezon și altitudine. Este caracterizată prin scăderea temperaturii cu altitudinea ($-1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$), umiditate variabilă, formare de nori asociată cu o mișcare importantă a aerului pe verticală și orizontală; (2) *stratosfera*, care este izotermă (-55°C) între 11 și 30 km, apoi, până la 50 km temperatura crește din nou, prin interacțiunea dintre radiațiile ultraviolete și ozon, după care, între 50–80 km, temperatura ajunge la -35°C ; (3) *ionosfera*, situată de la 80 la 700 km, este alcătuită din particule de gaz bombardate intens de radiațiile ultraviolete cu lungime de undă redusă, fiind, de aceea, complet ionizată. În ionosferă, temperatura crește progresiv până la $1\,000^{\circ}\text{C}$ la 700 km; această temperatură se referă la energia cinetică mare a moleculelor ionizate, dar, ținând seama de extrem de slabă densitate a particulelor, ea nu corespunde căldurii în sensul convențional al cuvântului.

Compoziția atmosferei rezultă dintr-un amestec de gaze conținând particule lichide și solide în suspensie. Constituții aerului atmosferic se pot clasifica în două categorii: (1) cu caracter permanent, fie prin stabilitatea extremă a stării lor chimice (de exemplu, neonul), fie prin constanța concentrației (de exemplu, azotul); (2) cu caracter variabil, ce apar în atmosferă numai în cursul unui ciclu consecutiv căruia i se modifică faza (de exemplu, vaporii de apă) sau de natură chimică (ozonul format prin acțiunea fotochimică a radiației solare asupra O_2).

Din punct de vedere termodinamic, meteorologii consideră aerul atmosferic ca un amestec de două gaze: aerul sec și vaporii de apă. Compoziția aerului sec este prezentată în tabelul 21.1.

TABELUL 21.1

Compoziția aerului sec		
Gazul constituent	Volume (%)	Mase moleculare
Azot (N_2)	78,09	28,016
Oxygen (O_2)	20,95	32,000
Argon (Ar)	0,93	39,944
Bioxid de carbon (CO_2)	0,03	44,010
Neon (Ne)	$1,8 \cdot 10^{-3}$	20,183
Heliu (He)	$5,24 \cdot 10^{-4}$	4,003
Krypton (Kr)	$1,0 \cdot 10^{-4}$	83,070
Hydrogen (H_2)	$5,0 \cdot 10^{-5}$	2,016
Xenon (Xe)	$8,0 \cdot 10^{-6}$	131,300
Ozon (O_3)	$1,0 \cdot 10^{-6}$	48,000
Radon (R)	$6,0 \cdot 10^{-14}$	222,000

Compoziția aerului sec poate fi considerată constantă până la 80 km altitudine. La peste 80 km, producția de oxigen atomic, prin fotodisociere, poate provoca schimbări de compoziție importante.

Pe baza acestor modificări de compoziție ale aerului pe verticală, atmosfera este divizată în *homosferă*, până la 80 km, și *heterosferă*, la peste 80 km altitudine.

Conținutul aerului în vaporii de apă variază foarte mult pe glob, de la 0,1% în Siberia, la 5% în regiunile maritime ecuatoriale. Ca urmare, s-au introdus diferiți parametri ce cuantifică umiditatea.

21.5.2. PROBLEME FIZIOLOGICE ALE ZBORULUI ÎN ATMOSFERĂ

Dezvoltarea transportului pe calea aerului transformă studiul modificărilor din organism în timpul zborului cu avionul într-o problemă curentă de fiziologie ambientală.

Principala problemă pe care o ridică zborul în avion este, ca urmare a altitudinii de zbor, reducerea oxigenului din aer. În acest sens, o serie de aspecte au fost prezentate la subcapitolul referitor la influența

altitudinii asupra organismului. Ca urmare, ne vom referi în continuare doar la date strict specifice zborului la altitudine. Pentru definirea deficienței în oxigen a aerului la altitudine s-a propus termenul de *aerohipoxie*. Scăderea concentrației O_2 în aer se produce conform legii Dalton, după care presiunea barometrică totală este egală cu suma presiunilor parțiale ale tuturor gazelor constituente și implicit ale vaporilor de apă. Ca urmare, presiunea parțială a fiecărui component gazos va rezulta din produsul dintre presiunea barometrică și fracțiunea sa din concentrația totală. De exemplu, pentru oxigen: $\text{PO}_2 = P_{\text{a}} \times \text{FO}_2$, unde PO_2 = presiunea parțială a oxigenului, P_{a} = presiunea barometrică și F = fracțiunea gazului din concentrația totală. La nivelul mării, presiunea parțială a O_2 în aerul uscat va fi: $\text{PO}_2 = 760 \times 0,2095 = 159\text{ mmHg}$ sau torr. Deoarece aerul inspirat pătrunde însă în căile respiratorii încălzit, aproximativ la temperatura organismului, și saturat cu vaporii de apă, care exercită o presiune de 47 torr, aceștia vor diminua presiunea barometrică reală. De aceea, PO_2 reală din aerul pătruns în plămâni devine: $\text{PO}_2 = (P_{\text{a}} - 47) \times 0,2095 = 149\text{ torr}$.

Persoanele expuse la altitudine mare își pierd conștiința când PO_2 alveolar se reduce la 30 torr. Aceasta ar corespunde, în realitate, după calculul coeficientului de ventilație, la 4,8 km, ca urmare a creșterii ventilației; frontiera de toleranță sporește la 7 km, câștigându-se astfel 2,2 km în toleranța la altitudine.

Acțiunea CO_2 , stimulul dominant al respirației, este redusă în expunerea acută la înălțimi mari, ca urmare a scăderii presiunii sale parțiale. Tot CO_2 provoacă o reducere a fluxului sanguin la nivelul inimii și creierului, accentuând efectele hipoxiei. Din acțiunea contradictorie a hiperventilației cu cea a bixidului de carbon se produce un compromis fiziologic. Se înțelege astfel de ce nu crește toleranța la înălțime printr-o ventilație suplimentară voluntară, ea interferând o autoreglare fiziologică. Adăugarea în gazul inspirat a unei concentrații controlate de CO_2 ar trebui să atenueze efectele altitudinii, dar este mai practică o adăugare de oxigen.

Cel mai fiziologic mijloc de protecție rămâne adaptarea curbei de disociere a oxihemoglobinei, menționată anterior, ca și redistribuirea sângelui în diferite organe.

Manifestările aerohipoxiei sunt sărace, depinzând de rata de ascensiune, altitudinea finală și durata expunerii. Apare mai întâi o senzație de disconfort, ce poate servi ca semnal de alarmă. Scăderea judecății critice și a autocontrolului, ca și euforia, ori alte manifestări subiective pot fi atenuate prin prevenirea persoanelor de pericol. S-au efectuat foarte multe experimente în barocameră, de către cercetători avizați. Iată câteva rezultate obținute în neurohipoxia creată artificial, corespunzând la o ascensiune de 300 m pe minut, echivalentă zborului cu balonul sau într-un avion fără cabină presurizată sau oxigen: până la 3 km nu se constată modificări respiratorii sau cardio-vasculare, ci doar o diminuare a capacității de învățare și a adaptării la întuneric; între 3 și 5 km începe compensarea fiziologică respiratorie și cardio-vasculară, capacitatea de efort se reduce, descresc performanțele mintale, dar timpurile de reacție simpli nu sunt modificate; între 5 și 7 km frecvența cardiacă și cea a respirației cresc, însoțite de cefalee și amețeli, continuate cu apatie și indiferență; reacțiile emoționale sunt variabile, de la euforie la depresie și atitudine agresivă; coordonarea neuro-musculară scade, exprimată clar prin deteriorarea scrisului. Fenomenele pot avansa până la pierderea conștiinței; deși altitudinea la care se produce această tulburare majoră este variabilă, pentru majoritatea subiecților ea se situează la 7 km. S-a remarcat rezistența deosebită a persoanelor acclimatizate la viața în localități situate la mari altitudini terestre.

Cel mai eficient remediu pentru suprimarea efectelor neuro-psiheice este creșterea PO_2 în aerul inspirat la un nivel apropiat de cel al mării. În acest scop s-au realizat diferite tipuri de măști ce asigură, la nivelul unei pieșe ce se adaptează în gură, un debit suficient de oxigen, provenit dintr-un rezervor cu capacitatea de 500 ml, atașat la mască. Limita utilizării echipamentului cu oxigen este de circa 12 km. De la acest punct, presiunea barometrică obținută prin utilizarea oxigenului 100% este prea redusă spre a menține o presiune de oxigen la nivel pulmonar care să asigure un minim de siguranță.

Zborurile la altitudini de peste 12 km devin posibile prin presurizarea cabinei de pilotaj, asociată cu utilizarea măștii de oxigen, această soluție fiind valabilă până la 15,2 km. În continuare apar modificări particulare ale mecanicii respiratorii. Dacă, în mod fiziologic, inspirul este activ, efortul depus în mod normal este acum suplinit de regulatorul de oxigen al măștii, pătrunderea gazului provocând destinderea pasivă a plămânilor. Pentru expir însă, în mod normal pasiv, trebuie depuse eforturi considerabile. Mai importante ca efect sunt modificările circulatorii provocate de creșterea presiunii intraoracice, ce se opun returului sângelui venos în torace, crescând astfel presiunea sanguină în inima dreaptă. Ca o adaptare rapidă, crește presiunea arterială, circulația fiind astfel menținută, dar sporirea cantității de sânge, în scurt timp în

tot sistemul venos, nu este tolerată prea mult timp de organism. Presiunea venoasă periferică mai produce trecerea de plasmă în țesuturi, ceea ce conduce la colaps prin reducerea volumului circulator. Ca urmare, frontiera de altitudine a zborurilor cu avionul a fost ridicată până la 30 km, prin utilizarea unor mijloace care să suprimă efectele creșterii presiunii intratoracice. În acest scop, se aplică la nivelul toracelui și membrilor o contrapresiune ce se poate obține cu ajutorul unui „combinezon” special. Cercetările modificărilor fiziologice ale funcțiilor respiratorii și cardiovasculare în condițiile amintite au atras atenția asupra unor acțiuni importante, dovedindu-se utile în clinica medicală.

Un alt aspect apărut odată cu extinderea zborurilor cu avionul constă în modificările induse de *decompresiunea hipobarică*. Primele observații certe au fost efectuate de piloți care, în ultimul război mondial, zburau ore întregi, la circa 10 km, în cabine nepresurizate. Ulterior, fenomenul a fost studiat în laboratoare. La altitudine de 11,5 km, 50% din subiecți prezintă simptome de decompresiune, ce dispar la majoritatea după o oră de la revenire la presiune atmosferică, în 30% din cazuri tulburările persistând 2-3 ore. Există o variabilitate individuală, predispoziția crescând la obezi și vârstnici.

În contrast cu aerohipoxia, răul prin decompresiune hipobarică este greu predictibil și cu o expresie polimorfă. Cel mai frecvent apar dureri articulare, cu afectarea motilității. Recomprimarea la altitudine joasă conduce la restabilirea completă, dar, după revenirea la altitudine, durerile reapar exact la nivelul acelorași articulații. Mult mai puțin frecvent, dar mai alarmant, este disconfortul respirator, accentuat prin inspir profund și tuse. În unele situații, el poate evolua spre asfixie și colaps. Rareori apar decolorări și „marmorări” la nivelul pielii. Au fost descrise și tulburări neurologice variate: voalarea vederii, defecte ale câmpului vizual, anestezie regională, paralizii selective ale extremităților, toate dispărând rapid după recomprimare. Extrem de rar se poate produce șocul, care impune expunerea subiectului în camere hiperbare cu oxigen.

Explicația fiziologică a acestor tulburări se suprapune într-o măsură cu cea a modificărilor apărute în mediul hiperbaric, existând însă și unele particularități. La presiunea normală, fluidele organismului sunt saturate cu azot și alte gaze inerte, funcție de presiunea parțială din plămâni. Când scade presiunea mediului, saturarea cu azot devine în noile condiții suprasaturare și, în consecință, se tinde la eliminarea excesului de azot prin plămâni. Sunt necesare câteva ore pentru revenirea la noul nivel de saturație și, în plus, rata de îndepărtare a azotului nu este aceeași pentru diferite zone ale organismului. Ca urmare, se formează mici bule de azot, tolerate bine în țesuturi cu o complianță suficientă; dimpotrivă, când mediul nu este elastic, presiunea determinată de bule persistă, poate provoca dureri, leziuni tisulare sau obstrucția curentului sanguin.

În aviația civilă aceste inconveniente se rezolvă prin presurizarea cabinelor cu călători, unde presiunea oxigenului rămâne mereu de minimum 150 mmHg. Se reduce, astfel, la minimum efectele barotraniei, iar răul de avion care apare la unele persoane mai sensibile este, în general, tolerabil.

21.5.3. ASPECTE FIZIOLOGICE ȘI FIZIOPATOLOGICE ÎNTÂLNITE ÎN COSMONAUTICĂ

Problemele fiziologice, uneori la limită cu fiziopatologia, puse de cosmonautică, sunt determinate, în esență, de două aspecte: natura mediului extratmosferic și dinamica zborului spațial. Ele nu diferă radical de cele ale aeronauticii, dar pot fi considerate adesea cazuri limită. Părăsind atmosfera terestră, omul nu abandonează doar sursa sa naturală de oxigen, ci și un veritabil scut protector exercitat de aceasta. Se știe că, în vidul cosmic, gazele dizolvate în lichidele și țesuturile organismului se degajă, iar apa se vaporizează. În plus, centura terestră de ozon oprește o fracțiune importantă din radiațiile extraterestre de origine galactică sau solară. De asemenea, în atmosferă sunt volatilizați, arși sau neutralizați din punct de vedere al energiei cinetice, prin frecare, meteoriții care în spațiul cosmic circulă liber, constituind o amenințare pentru viața cosmonauților. Ca urmare, natura mediului extraterestru impune izolarea omului de ambianță, într-o cabină sau un costum de scafandru etanșezate ermetic și conținând o atmosferă artificială.

Zborul spațial comportă trei faze: (a) în faza inițială, viteza vehiculului crește progresiv, organismele cosmonauților fiind supuse la accelerații mari și vibrații intense; (b) odată atinsă viteza necesară desprinderii de forța de atracție terestră, motoarele sunt oprite și se produce starea de imponderabilitate; (c) în faza

terminală a zborului, în timpul revenirii în atmosfera terestră, organismul este supus la o decelerație accentuată și la o creștere a temperaturii ambiante.

Efectele primei faze și ale celei de-a treia depind decisiv de tehnicile de lansare și revenire în atmosferă, în aceste perioade producându-se uneori incidente și accidente. Progresele tehnice realizate au atenuat în mare măsură efectele asupra cosmonauților, dar mai rămân încă unele probleme de rezolvat. Tehnicile utilizate diferă sensibil în cazul celor două „superputeri” angajate, alături de alte țări, în explorarea cosmosului și o colaborare în acest sens ar ameliora rezultatele. În ceea ce privește starea de imponderabilitate, s-a încercat atenuarea sau chiar suprimarea ei prin crearea unei presiuni artificiale, echivalentă atmosferei terestre.

21.5.3.1. Atmosfera artificială din cabina spațială

Compoziția și presiunea atmosferei artificiale din cabina spațială etanșă trebuie, în principiu, să fie comparabile cu condițiile de la nivelul mării, pentru ca randamentul fizic și psihic al cosmonauților să se desfășoare în condiții optime. În consecință, în unele tipuri de cabine spațiale s-a conservat presiunea de 760 mmHg, dar imperative de ordin tehnic și, în mod deosebit, probabilitatea de ruptură a peretelui cabinei incită tot mai mult o îndepărtare de la aceste condiții ideale pentru adoptarea unor soluții care să ațeneze acest risc major.

Un accident mecanic, perforarea cabinei de către un meteorit, poate provoca, în câteva milisecunde, scăderea la zero a presiunii din cabină, ca rezultat al decompresiunii rapide sau explozive. Efectele asupra organismului sunt legate, pe de o parte, de variația presiunii gazoase totale și de viteza acestor variații și, pe de altă parte, de acțiunea vidului cosmic.

Fenomenele provocate de scăderea bruscă a presiunii barometrice sunt imediate. În momentul decompresiunii, distensia gazelor conținute în organele cavitare, închise sau semiînchise (stomac, intestine, sinusuri faciale, ureche medie, plămâni), provoacă barotraume. Dacă ieșirea gazelor se efectuează prin orificiile naturale tot atât de rapid ca prin orificiul rezultat prin perforarea cabinei, este posibil să nu rezulte nici o rupere tisulară. Astfel, după încercări pe animale, la decompresiune bruscă au fost efectuate experimente pe voluntari, constatându-se că o presiune diferențială de 340 mmHg a fost perfect suportată. De aceea, presiunea de 300 mmHg adoptată pentru majoritatea cabinelor navelor cosmice protejează cosmonauții de ruptura organelor interne în caz de accident. Vidul cosmic, însoțit de temperaturi foarte scăzute, are următoarele efecte: vaporizarea apei, anoxia bruscă, disbarismul, răcirea organismului. În vidul spațial, apa organismului trece în stare de vapor, fenomen deosebit de fierberea produsă prin aport caloric exterior sistemului. Căldura necesară vaporizării este captată din organism, vaporizarea oprindu-se când totalitatea lichidelor organismului a trecut, prin congelare, în stare solidă. La 6 s de la decompresiune debutează vaporizarea în auricule, producând embolii gazoase și la nivelul pleurei, unde antrenează un colaps pulmonar parțial. În 8 s presiunea arterială se prăbușește, circulația sângelui se întrerupe, privând instantaneu țesuturile de oxigen și antrenând o vaporizare generală. Se produce o mărire de volum a organismului, limitată de rezistența țesuturilor la distensie, însoțită de tegumentelor. Frecvența cardiacă scade considerabil, stopul cardiac apare în două minute. Dacă subiectul este recomprimat în primele 80 s de la accident, vaporii trec instantaneu în stare lichidă, contracțiile cardiace redevin eficiente și, în general, nu se observă sechele.

Fenomenele descrise anterior sunt atât de dramatice și rapide, încât acoperă prin amploarea lor pe celelalte. Astfel, efectele anoxiei bruște, determinată de vidul spațial, nu pot fi observate decât dacă, în momentul perforării cabinei, cosmonautul poartă un „costum de altitudine” ce împiedică vaporizarea. În acest caz, ca urmare a privării de oxigen, în 13-15 s apar dezorientarea, confuzia, incapacitatea formulării unui raționament corect și, în 17-19 s, pierderea conștienței. Mișcările voluntare se opresc, mușchii se relaxează, se observă câteva mișcări convulsive, dilatație pupilară, relaxarea sfincterelor, sincopă respiratorie, apoi oprirea oricărei activități electrice a creierului. Totuși, contracțiile cardiace persistă până la 2 minute. Dacă reoxigenarea este efectuată în acest interval se obține o recuperare funcțională, iar subiectul nu conservă nici o amintire despre accident.

Disharismul, adică ansamblul fenomenelor determinate de degajarea gazelor dizolvate în lichidele și țesuturile organismului, este mai lent. Volumul total de gaze libere (azot, argon, CO_2) este redus, la circa 1 litru în cazul omului și, în consecință, nu are un rol important în aceste accidente. Perturbările variază în funcție de țesuturile sau organele afectate: dureri articulare, prurit și eritem cutanat, nevralgii, tulburări pulmonare, cardiace și nervine. Disharismul poate surveni când cosmonautul pătrunde fără precauții în cabină, unde presiunea barometrică este de 300 mmHg. Pentru a-l evita, este suficient ca el să respire câteva zeci de minute oxigen pur, în scopul eliminării excesului de azot.

Toate pericolele rezultând din expunerea organismului la vidul cosmic sunt îndepărtate prin îmbrăcarea costumului de altitudine, cu cască etanșă, asigurând o oxigenare convenabilă și o contrapresiune de ordinul a 145 torr pe ansamblul corpului. Utilizarea „combinezului spațial” permite decompimarea cabinei și evoluția la exterior.

Paralel cu problema presiunii din interiorul cabinei se pune cea a compoziției chimice a atmosferei interioare. Utilizarea oxigenului în locul unui amestec gazos este posibilă, cu condiția de a opta la o presiune joasă, de circa 300 mmHg, ce poate fi suportată un timp nedefinit. Atmosfera monogazoasă prezintă avantaje tehnice, realizare simplă și control facil, dar crește riscul de incendiu. Concomitent, este necesară o îndepărtare sistematică a CO_2 , eliminat de cosmonauți, rămânerea îndelungată în cosmos impunând condiții foarte apropiate de cele de la nivelul mării; de aceea, presiunea O_2 în cabină trebuie să fie mereu între 145–300 torr oxigen, în timp ce PCO_2 nu trebuie să depășească 5 torr. Până în prezent s-a apelat la absorbția chimică a CO_2 . Pentru călătorii mai lungi, rezervele de oxigen lichiefiat, îmbuteliat, ar deveni prea voluminoase și, de aceea, se apelează la procedee chimice de obținere a oxigenului. În perspectivă se încearcă un procedeu ideal, reciclarea bioxidului de carbon, cu recuperarea oxigenului, grație simbiozei între organism și vegetalele cu funcție clorofiliană.

21.5.3.2. Mediul cosmic sau spațial

Expresia de vid cosmic nu corespunde realității, cosmonautul fiind expus radiațiilor de origine extraterestră, variațiilor câmpului magnetic și, mai puțin, meteoriților.

În spațiul cosmic temperatura variază între -150°C și $+150^\circ\text{C}$, în funcție de orientarea față de soare, natura și culoarea materialului expus. Presiunea este extrem de scăzută, de ordinul 10^{-13} mmHg. Este inutil de precizat că majoritatea structurilor vii nu supraviețuiesc în acest mediu foarte ostil vieții. Totuși, pe suprafețele vehiculelor spațiale au fost găsite microorganisme vii, chiar după 4 luni de expunere, în zonele neexpuse radiației solare. Recordul de supraviețuire aparține unui streptococ, izolat pe o cameră de televiziune plasată în sonda spațială Surveyor III, după o rămânere pe lună de 2 ani și jumătate. Cosmonauții sunt însă protejați de vidul și temperaturile cosmice.

Pentru om, riscul cel mai constant este cel al radiațiilor corpusculare (electroni, protoni, gelioni, nuclee grele ca Fe, Ni, Ca, C, O_2) și electromagnetice sau fotonice (gamma, X, ultraviolete, luminoase, infraroșii). Unele elemente sunt de origine galactică, având o foarte mare energie și viteză, altele de origine extragalactică. Radiațiile solare devin foarte intense în perioadele erupțiilor solare.

În jurul pământului există două câmpuri magnetice circulare ce opresc o mare parte din radiațiile cosmice, formându-se, astfel, centurile radioactive Van Allen. În cursul zborurilor interplanetare, traversarea centurilor Van Allen trebuie să se facă rapid, pentru evitarea absorbției de doze importante de radiații. O altă soluție constă în părăsirea pământului la nivelul polilor.

Fotonii și particulele cu energie joasă nu penetrează pereții cabinei, dimpotrivă, particulele de înaltă energie pot traversa blindaje din oțel de câțiva centimetri. Frațiunea de energie absorbită la nivelul peretelui devine sursă de radiații secundare, ce creează o ionizare locală foarte crescută, afectând cosmonauții. Deocamdată, nu se cunoaște suficient riscul de iradiere în timpul zborurilor cosmice, totuși, după un sejur de mai multe luni în spațiul cosmic, el poate crește.

Expunerea la câmp magnetic conține două alternative: străbaterea câmpului magnetic intens, care înconjură pământul și, apoi, acțiunea unui câmp magnetic foarte slab sau nul în spațiu. Nu se cunosc, încă, efectele rămănerii îndelungate în zone amagnetice.

Un risc foarte redus îl prezintă cînșirea navei spațiale cu micrometeoriti. Aceștia se deplasează cu viteze foarte mari, 10 km/s până la peste 270 km/s. Masa lor redusă, unenri de ordinul picogramelor, nu permite traversarea peretelui cabinei. Probabilitatea de impact cu un meteorit având masa de 1 g este, pentru un vehicul cu diametrul de 3 m, de o dată pe an. Nici acest impact nu perforază perețile.

21.5.3.3. Consecințele accelerației și decelerației

Din punct de vedere fiziologic, lansarea rachetei și revenirea navei spațiale în atmosfera terestră sunt de aceeași natură: accelerațiile și decelerațiile pun în joc forțe de inerție. Se modifică doar sensul acestor forțe, dar, în ambele cazuri, se produce o creștere a greutății, care este egală, așa cum se știe, cu produsul dintr-o masă și accelerație. În plus, în cursul funcționării lor, motoarele sunt surse de vibrații.

Ca urmare a accelerațiilor și decelerațiilor apare o stare de supraponderabilitate, ce provoacă o mărire temporară a greutății organismului. Deoarece diversele lichide și țesuturi din corpul uman nu sunt omogene, deci nu au aceeași densitate, creșterea greutății lor este și ea neomogenă, antrenând o serie de perturbări. Creșterea greutății diferitelor organe poate fi calculată teoretic în funcție de: intensitatea accelerațiilor, rapiditatea cu care ele sunt atinse, sensul în care se exercită și durata lor. Aceste calcule teoretice au fost confirmate experimental și, în consecință, în prezent, efectele supraponderabilității sunt bine cunoscute în aeronautică. A devenit, astfel, posibilă alegerea unor caracteristici ale accelerației și decelerației care să facă tolerabile pentru om lansarea și revenirea pe pământ.

O accelerație de 6,65 de ori mai mare decât accelerația gravitațională (deci de 6,65 g), acționând 2 minute, permite atingerea vitezei necesare pentru propulsarea unui satelit pe orbită, în timp ce la 3,32 g sunt necesare 4 minute pentru a obține același rezultat. În scopul atingerii vitezei necesare pentru desprinderea de atracția terestră, este necesară o accelerație de 9,2 g, acționând 2 minute, sau 4,6 g, timp de 4 minute.

Revenirea în atmosfera terestră se face mai lent, pentru evitarea decelerațiilor considerabile și a combustiei vehiculului, prin frecarea cu aerul. Se ating decelerații de 6–7 g, timp de 3–4 minute.

Forțele de inerție dezvoltate de aceste accelerații și decelerații sunt greu suportate când se exercită după axul longitudinal al corpului. Dacă nasele și mușchii rezistă, fluidele organismului, îndeosebi sângele, se deplasează către membrele inferioare sau spre extremitatea cefalică, după sensul forțelor de inerție.

Când sângele părăsește regiunea cefalică apar tulburări de vedere cu senzație de voalare a obiectelor, până la cecitate. Urmează pierderea conștiinței. Aceste tulburări sunt pasagere, cu condiția ca accelerațiile să nu treacă de câteva minute. Dacă sângele trece de la nivelul membrilor inferiori spre extremitatea cefalică, apar dureri intense, turgescență a mucoaselor, hemoragii rino-faringiene, senzația de „vedere roșie”, până la orbire temporară și pierderea conștiinței.

Când forțele de inerție se exercită în planul transversal al corpului, abdomen-zona dorsală, și invers, sau lateral, pe flancuri, ele sunt mult mai bine suportate. Subiectul resimte o impresie de compresie toracică, dar poate suporta această situație 3 minute la o accelerație de 6 g și aproape 2 minute la 8 g. De aceea, cosmonauții sunt lansați în spațiul cosmic întotdeauna în decubit dorsal. La revenirea în atmosferă, cabina este basculată înainte, în timp ce cosmonauții păstrează aceeași poziție. Ca urmare, forțele de inerție dezvoltate prin decelerație se exercită în același sens ca în momentul plecării, abdomen-zona dorsală.

Fazele active ale zborului, lansarea și revenirea în atmosferă sunt acompaniate de fenomene secundare: vibrații-trepidații și vibrații acustice, zgomote, infrasunete și ultrasunete. Vibrațiile, unenri jenante, nu depășesc totuși pragul de toleranță pentru durata expunerii. O parte din energia lor este absorbită de materiale interpușe, iar sistemul acustico-vestibular este protejat, într-o măsură, de cască.

21.5.3.4. Starea de imponderabilitate

Faza pasivă a călătoriilor în spațiul cosmic creează starea de imponderabilitate sau agravitație. Efectele fiziologice ale acestei stări au fost îndelung cercetate în laboratoare, cu ajutorul simulatoarelor. Prin zborurile orbitale prelunșite și cu ocazia primilor pași ai omului pe lună s-au obținut numeroase informații, mult mai valoroase decât primele, deoarece imponderabilitatea, spre deosebire de bipergravitație, nu poate fi reprodusă perfect în laborator.

Speciile animale de pe pământ au apărut și au evoluat continuu, adaptându-se la gravitația terestră. Este, de aceea, de interes pentru medicină și biologie, în general, să se observe modificările fiziologice ale organismului în condițiile absenței îndelungate a gravitației.

Starea de imponderabilitate perturbă o numeroasă funcții, dar nu împiedică activitatea oormală a omului, îndeosebi pe parcursul a câtorva săptămâni.

Vom enumera pe scurt, în continuare, principalele modificări produse de starea de imponderabilitate. De la începutul fazei orbitale a zborului, se produce o redistribuire a masei sanguine în *sistemul cardio-vascular*: 0,6 până la 2 litri de sânge abandonează partea inferioară a corpului pentru a se dirija spre regiunile cefalică, cervicală și toracică. Sângele se acumulează inclusiv la nivelul inimii, producând o dilatație atrială și, prin receptorii sensibili la variațiile de volum de la acest nivel, pe cale nervoasă, se va diminua brutal secreția de hormon antidiuretic, la care se adaugă diminuarea secreției de renină și aldosteron. Rezultă o creștere a diurezei și, implicit, o pierdere urinară de sodiu. Așa se explică reducerea volumelor lichidiene, exprimată printr-o pierdere în greutate de 2-4 kg, observată la cosmonauți. Aceste fenomene sunt, totuși, tranzitorii și, așa cum au demonstrat lucrările lui C. Berra și colab., organismul se adaptează la noile condiții. Astfel, hipovolemia va antreoa rapid o reacție inversă, adică hipersecreție de aldosteron și ACTH. Ca urmare, în ziua a patra de zbor volumele lichidiene și greutatea cosmonautului se stabilizează pentru întreaga durată a misiunii spațiale. Cordul pare puțin afectat, tahicardia funcțională din timpul lansării fiind urmată de un ritm normal sau chiar de o bradicardie. Tensiunea arterială este ușor diminuată, iar debitul cardiac ușor crescut, așa cum au arătat studiile pe cosmonauții stației Saliut 6. Chiar dacă aceste modificări sunt minime, aparatul cardio-vascular funcționează în condiții anormale pe toată durata zborului. Astfel, modificările poziției corpului nu mai pot angaja fenomene reflexe ce permit evitarea, la sol, a acumulării de sânge în segmentele inferioare, când corpul are poziție verticală. De aceea, astronautii pot prezenta vertij, greață sau tendințe la sincope, prin trecerea de la clinostatism la ortostatism. Aceste tulburări sunt efemere și se previo prin utilizarea în timpul zborului a unor aparate de joasă presiune, care să provoace returnul sângelui din membrele inferioare. Cercetările întreprinse în timpul rămânării prelungite în spațiul cosmic, ca în cazul misiunilor Saliut-Skylab, au permis o explicare a acestor fenomene și, de asemenea, ele sunt utile pe un plan mai larg în cunoașterea mecanismelor reglatoare ale circulației sanguine și ale volemiei.

În zborurile de lungă durată se presupune că este posibilă o hipotrofie miocardică, evitabilă printr-o gimnastică adecvată.

După sistemul cardio-vascular, *aparatul vestibular* este cel de-al doilea sistem modificat prin absența presiunii. În imponderabilitate, percepția vizuală și receptorii musculari funcționează normal. Dimpotrivă, unele componente proprioceptive sunt influențate și, în primul rând, graviceptorii situați la nivelul articulațiilor și tegumentelor, iar, în mod particular, aparatul vestibular. Ciliile membranei otolitice rămân imobile în ortostatism sau în momentul modificării poziției capului. Dimpotrivă, otoliții continuă să se deplaseze la mișcările bruște ale organismului. Ca urmare, centrii nervoși superiori nu mai primesc semnale normale și apare impresia de plutare, de rotație, în cazul mișcărilor bruște ale capului, diminuarea activității motrice datorită localizării imprecise a obiectelor, precum și semnele clasice de „rău de călătorie” (paloare, greață, vertij, vomismente). Se produc și iluzii senzoriale, legate de discordanțele între informațiile furnizate de văz și cele provenind din urechea internă, ceea ce provoacă o oarecare dezorientare. Noțiunile de sus și jos dispar. Aceste tulburări sunt, cel mai adesea, efemere, apar în prima zi și dispar în general după 3-4 zile, organismul probând astfel remarcabile posibilități de adaptare. Tulburările vestibulare, îndeosebi o pierdere a echilibrului, pot apărea și la reîntoarcerea pe pământ, dar dispar în câteva zile.

Studiul fiziologiei vestibulare a beneficiat, în mod evident, de datele obținute în zborurile cosmice. Suprimându-se, în mare parte, prin imponderabilitate rolul aparatului otolitic, s-a constatat exagerarea funcției vizuale, care intervine, de asemenea, în determinarea echilibrului. Fiziologia spațială permite, de asemenea, studiul corelației între analizatorul vizual și sistemul vestibular.

Ingestia de alimente sodice și îndeosebi de lichide este suportată cu dificultate. Inconveniențele se evită prin priza de alimente uscate și rehidratate în pungi de material plastic în momentul ingestiei. După angajarea alimentelor în esofag, progresia lor se efectuează pe cale reflexă, iar digestia se desfășoară normal.

La nivelul *sistemului locomotor*, imponderabilitatea exercită o serie de efecte și, în primul rând, datorită suprimării greutății corpurilor și obiectelor, produce o punere în repaus parțial a acestui sistem. Discurile intervertebrale, în mod normal comprimate prin greutatea corpului, se pot destinde, ceea ce explică creșterea taliei astronautilor cu 2-4 cm. A fost obiectivată o demineralizare a oaselor, prin pierderea calciului, relevată radiografic după zbor. Ea se acompaniază de o atrofie a traseelor țesutului osos spongios. S-a observat o creștere cu 50% a excreției urinare de calciu, care apare foarte curând și se stabilizează după o lună. Ținând seama de aportul alimentar, pierderea de calciu este de 100 mg pe zi (misiunile Skylab).

Demineralizarea a fost comparată cu osteoporoza vârstnicilor și variază funcție de doi factori: individual și durata zborului. În cadrul zborului Saliut 6, de 175 de zile, s-a constatat o demineralizare variind între 2 și 8%. Cu toate că pierderile calcice diminuează prin practica exercițiilor fizice (cu resorturi elastice) asociate cu regim alimentar bogat în calciu, ele nu pot fi niciodată suprimate în întregime.

Mecanismul demineralizării nu este suficient de clar, fiind legat, probabil, deopotrivă de o osteoliză exagerată și de o reducere a osteogenezei. Ea traduce o perturbare a mecanismelor responsabile de remanierile osoase, care se produc în mod normal la adult și conduc la reînnoirea constantă a substanței osoase. Remanierile osoase depind însă, în afară de acțiunea presiunii asupra scheletului, și de o serie de hormoni, îndeosebi de calcitonină și parathormon. În spațiu, acești hormoni nu se modifică, așa cum au probat dozările din cadrul misiunii Skylab. Dimpotrivă, se pare că alterările osoase din imponderabilitate depind, pe plan hormonal, de o hipersecreție de glucocorticoizi. La șobolani trimiși în spațiu, s-a constatat o hipertrofie a suprarenalelor, o hiperconcentrare de calciu, ele nu pot fi niciodată suprimate în întregime.

Se poate afirma că alterările osoase reprezintă una din problemele viitoarelor zboruri cosmice de durată, din două motive: (a) o demineralizare excesivă creează o fragilitate osoasă, cu risc de fracturi; (b) o mobilizare excesivă a calciului ar putea da naștere la focare de calcificare în afara oaselor, sau care pot fi la originea unor calcii renali, cu toate consecințele unei litiaze renale.

În afara scheletului, *sistemul muscular* se modifică prin imponderabilitate; studii antropometrice au probat o diminuare a diametrelor gambelor și coapselor. Biochimic, se constată o degradare a proteinelor musculare, cu antrenarea unor pierderi azotate importante. Au fost observate alterări iofracțurale ale fibrelor musculare striate și ale plăcilor motorii. Totuși, practica repetată a exercițiilor fizice permite evitarea lor, fapt probat prin examinarea cosmonauților sovietici, după 175 de zile de zbor în stația cosmică Saliut. Important este și faptul că fenomene comparabile ar putea afecta și miocardul, poziție confirmată de reducerea cu 1% a siluetei cardiace la cosmonauții misiunii spațiale Skylab.

Există în timpul zborului o *ameliorare a acuității vizuale*. Cosmonautul Cooper remarcă faptul că a putut observa mișcarea automobilelor la o altitudine de 80 km. În general, obiectele de formă liniară sunt mai bine percepute. Această ameliorare aparentă a acuității vizuale ar putea proveni din condițiile particulare de observație deasupra atmosferei.

Somnul nu este modificat, nefiind, deci, influențat de lipsa alternanței zi-noapte.

Pe plan *hematologic*, medicii americani și sovietici au observat o diminuare cu 10-15% a masei globulare, cu o reducere de 20-30% a reticulocitelor. Reducerea masei globulare provine din creșterea ratei de distrugere a hematiilor îmbătrânite, fenomen confirmat la șobolani (Cosmos 782), care prezentau o hemoliză de 3 ori mai importantă decât martorii. Acest răspuns este legat de absența gravitației, deoarece hiperhemoliza dispăre la șobolani plasați în centrifuge în timpul zborului.

Unele *glande endocrine* devio mai active; este cazul hipofizei, corticosuprarenalei și, probabil, al tiroidelor și glandelor genitale.

La șobolani s-a constatat o creștere a proceselor de apărare imunitară, neconfirmată însă sistematic. Diminuează flora bacteriană anaerobă și crește cea aerobă, suot mai frecvente sușele microbiene rezistente la antibiotice.

Reacțiile observate la nivelul unor organe sau al organismului întreg ar putea rezulta din modificări produse la nivel celular. De aceea, au fost efectuate o serie de experimente pe organisme unicelulare. Datele nu sunt încă edificatoare, dar s-a semnalat o creștere a volumului celular, ca urmare a pătrunderii apei în celule și a pierderii de Ca, P, K, Mg.

Presiunea este singurul factor de mediu care a rămas constant de la originea pământului și, de aceea, reprezintă un factor determinant în evoluția ființelor vii. Forma generală a speciilor și dezvoltarea scheletului apar ca adaptări la presiune, fapt sesizat încă de Galileo Galilei în anul 1638. Presiunea a fost,

deci, în parte, responsabilă, în cursul evoluției, de modificările succesive ale morfologiei componentelor scheletului și de forma generală a ființelor vii. Numeroase studii recente abordează influența presiunii asupra dezvoltării și s-a constatat că ea intervine din primele ore ale dezvoltării, determinând orientarea viitorului plan de simetrie bilaterală a embrionului și, mai târziu, a organismului. Din toate acestea rezultă interesul cercetărilor asupra modificărilor induse de imponderabilitate în rezolvarea unor variate aspecte de fiziologie.

Cucerirea spațiului cosmic înseamnă progrese uneori surprinzătoare, în domeniul din cele mai variate, atât prin perfecționarea unor tehnici și metode impulsinate de această reușită de excepție a omului, cât și prin datele concrete care se obțin în timpul misiunilor spațiale. Astfel se explică și spațiul pe care l-am acordat acestui subcapitol, nu ca o expresie a insolitului pe care îl prezintă orice pas al omului în explorarea infinitului cosmic, ci din considerente de ordin teoretic și practic impuse de zborurile cosmice.

21.6. FIZIOLOGIA MEDIULUI HIPERBARIC

Oamenii au încercat întotdeauna să penetreze sub suprafața mărilor și oceanelor, relatări ale unor astfel de tentative găsindu-se în scrierile lui Herodot, Pliniu și Aristotel. Abia în secolul al XIX-lea progresele științei și tehnicii au permis scufundarea cu o anumită securitate. În secolul nostru se realizează progrese decisive în investigarea „Jumii tăcerii”, cunoscută anterior doar prin probe indirecte. În 1930, scafandrii americani atingeau adâncimi de 100 m, utilizând un amestec respirator alcătuit din heliu și oxigen. Ultimele decenii sunt marcate de reușita excepțională a scafandrilor autonomi moderni, datorită cercetărilor Le Prieur, Commeinkes și Cousteau.

În ultimii ani, sub presiunea nevoilor științifice industriale și militare, penetrarea și stăpânirea de către om a domeniului submarin a dobândit un interes deosebit. S-a emis ipoteza că în viitor omul își va extinde mediul de viață și sub apă, dar, înainte de toate, în prezent, este de mare interes explorarea imenselor resurse ale mărilor și oceanelor. Cucerirea acestui domeniu este dificilă datorită mediului extrem de ostil, rece, obscur, coroziv și impermeabil pentru undele radio-electrice. În mediul submarin, legile presiunii domină, iar prevenirea efectelor acestora asupra organismului constituie preocuparea fiziologilor și a inginerilor.

Posibilitățile de pătrundere a omului în hidrospațiu se exprimă, în prezent, în două alternative: (a) submersia în incinte rigide; (b) scufundarea directă, de regulă cu echipamente speciale.

21.6.1. SUBMERSIA ÎN INCINTE RIGIDE

Din punct de vedere fiziologic, este foarte avantajoasă, deoarece organismul uman nu este supus presiunii apei, corespunzătoare adâncimii de scufundare. Scufundarea se produce în incinte rigide, în interiorul cărora echipajul se află la presiune atmosferică normală. Tipurile de submersibile sunt diverse: cel mai frecvent submarinul, apoi batiscaful, batisfera, turela, farfuria scufundătoare ș.a. În afara utilizărilor militare, îndeosebi în cazul submarinelor, submersibilele permit observații corecte utile, dar autonomia lor este uneori redusă.

Fiziologic, singurele limite în imersiile prelungește în de o serie de aptitudini umane, cele mai importante fiind: facilitatea de adaptare la sarcini foarte diferite, conștiințiozitatea profesională și sociabilitatea, calități indispensabile pentru viața în comun a unui echipaj într-un spațiu redus. De altfel, se efectuează, de regulă, o îmbarcare de probă, cu rolul de a testa aceste calități.

În continuare, ne vom referi la câteva caracteristici ale mediului de viață într-un submarin. Atmosfera incintei ocupate de echipaj este controlată în permanență și regenerată. În general, valoarea minimală pentru oxigen este de 17%, iar concentrațiile maxime pentru bioxid de carbon și oxid de carbon sunt de 1% și respectiv 50 ppm.

Oxigenul este reînnoit chimic, din clorat de potasiu, iar bioxidul de carbon este absorbit cu ajutorul varului sodat. La bordul submarinelor nucleare regenerarea atmosferei este mult mai elaborată, oxigenul obținându-se prin electroliză; două coloane de pământuri rare adsorb gazul carbonic. Alți poluanți, ca oxidul

de carbon și hidrogenul, sunt arși prin cataliză, în timp ce aerosolii sunt distruși prin precipitare electrostatică. Toate aceste procedee permit menținerea la bord a unor concentrații de gaze comparabile cu cele ale atmosferei.

Un alt factor important este monotonia vieții, exprimată nu numai printr-o apatie psihică, dar și printr-un dezechilibru pe plan fizic, tradus prin astenie și disfuncție digestivă. Se încearcă o corecție prin echipamente sportive și un program de distracții, precum și prin ședințe de instruire activă.

Dezechilibrul temporal, prin dispariția noțiunii de zi-noapte, este altă problemă, diminuată prin variații de ambianță și iluminare. Separația familială și izolarea sunt, de asemenea, greu de suportat. La submarinele propulsate de motoare Diesel se adaugă zgomotul și vibrațiile.

Temperatura incintelor submarinelor este de până la 55°C în compartimentul de propulsie și de 30-35°C în celelalte zone. Este imposibil de realizat o condiționare convenabilă a aerului, din cauza consumului de energie. Se încearcă, în ultima vreme, ameliorări.

Viaja pe un submarin, mic univers total izolat de exterior, deși dificilă, devine suportabilă prin caracterile individuale ale componentelor echipajului, care cooperează, oferind încă o probă de adaptare homeostatică, pe un plan mai subtil, psihic.

21.6.2. SCUFUNDAREA DIRECTĂ ÎN MEDIUL ACVATIC

Modalitățile de pătrundere în hidrospațiu constau în două alternative: (a) scufundarea liberă, în apnee; (b) scufundarea cu echipamente speciale.

Scufundarea liberă este clasică în cazul pescuitorilor de perle și limitată la câteva minute, deoarece rezerva de oxigen din organism este redusă, iar acumularea de bioxid de carbon în sânge produce stimularea directă a centrilor respiratori, exprimată prin necesitatea imperioasă de respirație și revenirea la suprafață. Prin respirația de oxigen, hiperventilație și antrenament, timpul de apnee poate fi prelungit; recordul este de circa 15 minute. În mod obișnuit, se rezistă 2-3 minute. Deși se mai practică, acest tip de scufundare prezintă un interes redus, iar, din punct de vedere fiziologic, examinarea scufundărilor cu mare rezistență la apnee prelungită nu a condus la concluzii certe. În prezent, s-a extins foarte mult scufundarea cu echipamente speciale, cu două alternative, scafandru greu și scafandru ușor. În primul sistem, scafandru greu, alimentarea cu aer se efectuează de la suprafață, printr-un tub de legătură între pompa ce realizează alimentarea și costumul scafandruului, la nivelul căștii rigide. Deși timpul de rămânere la adâncime se poate prelungi, autonomia acestui tip de scafandru este limitată și rămâne utilă pentru lucrul la adâncimi reduse, în preajma coastelor maritime. Dimpotrivă, scafandru ușor este autonom, de aceea se poate deplasa la adâncimi importante. Extins mult în ultimul timp, acest tip de scufundare se efectuează cel mai frecvent în următoarea situație: echipajul rămâne timp îndelungat la adâncime sub presiune, într-o casă laborator submarină, incintă din care cercetătorul iese periodic pentru explorarea și lucrul în mediul subacvatic. Echipamentul scafandruului autonom este complex și constă, în afara costumului, din aparatul de respirat subacvatic (alcătuit din butelii cu aer sub presiune, reductor de presiune, tuburi de legătură cu piesa bucală), vizor, tub respirator de suprafață, labe de înot, centură de lest, vestă de salvare, ceas subacvatic, busolă, profundimetru, precum și o serie de accesorii necesare explorării subacvatice sau lucrului la adâncime.

Elementul fundamental al vieții omului în mediul subacvatic este de ordin fiziologic. Omul este obligat să trăiască la o presiune ambiantă superioară celei normale și apoi el trebuie să revină la suprafață. Deși viața în primele sale forme a apărut în apele mărilor și oceanelor, iar animalele, inclusiv mamiferele și omul, păstrează încă o „amintire” a acestei origini în compoziția mediului intern, mediul subacvatic este complet ostil omului. Aceasta din cauza concentrației reduse de oxigen (circa 0,35% la 20°C), cât și datorită imposibilității captării sale, accesibilă doar animalelor ce posedă organe specializate. Experimental s-a încercat, totuși, captarea oxigenului din apă, cele mai promițătoare rezultate obținându-se prin utilizarea unor membrane de siliciu. Pagnelli și colab. (citați de C. O. Pastuch) au obținut supraviețuirea subacvatică a animalelor într-o cușcă ermetică cu un perete alcătuit dintr-o membrană siliconică. Dar aceasta este o problemă de viitor.

Asigurarea respirației este problema crucială de care depinde accesul și viața omului în mediul hiperbaric. În acest scop, au fost imaginat mai multe soluții, dintre care utilizabile sunt doar două, pe care le vom prezenta în secțiunea referitoare la aspectele tehnice ale accesului subacvatic.

Din foarte multe date acumulate referitoare la fiziologia mediului hiperbaric, vom sintetiza o serie de aspecte cu privire la: efectele hiperbarismului și gazelor la presiune crescută asupra organismului; problemele esențiale ale imersiei; problema decompresiei; alternative și metode de intervenție submarină.

21.6.3. EFECTELE HIPERBARISMULUI ȘI GAZELOR LA PRESIUNE CRESCUTĂ ASUPRA ORGANISMULUI

Presiunea este o mărime definită drept coeficient al unei forțe exercitate asupra unei suprafețe. Valoarea sa se exprimă în general în bari (1 bar = 10^6 dyn/cm², sau 10^5 pascali, ori 0,9869 atmosfere, sau 1,10197 kg/cm²). Apa este de 800 de ori mai densă ca aerul, iar, dacă la nivelul mării, la suprafață, organismul este supus doar presiunii atmosferice (presiunea atmosferică: 760 mmHg = 1,013 bar), în scufundare se adaugă presiunea hidrostatică, datorată greutatei coloanei de apă aflate deasupra. Presiunea apei crește cu aproximativ 1 atm, sau 1 bar, la fiecare 10 m adâncime. Efectele multiple ale presiunii asupra organismului pot fi sistematizate în trei grupe: mecanice, biofizice și biochimice, la care se adaugă efectele deperdiției calorice. Cunoașterea acestor efecte este extrem de importantă în practica imersiei prin intermediul sistemelor-scafandru.

Efectele mecanice ale presiunii hidrostatice se descriu considerând organismul ca fiind alcătuit din gaze (de fapt, cavități cu conținut gazos), lichide (umorile, dar și țesuturile moi) și solide (țesuturile osoase). Lichidele și solidele sunt practic incompresibile, modificările structurale nu apar decât la sute de atmosfere și, deci, disbarismul subacvatic nu va acționa în acest caz. Dimpotrivă, în cavitățile cu conținut gazos, efectele presiunii se resimt puternic, conform legii Boyle-Mariotte, după care, odată cu creșterea presiunii, volumul gazului scade. Astfel, un volum de aer de 1 000 cm³ (la presiunea atmosferică de 1 atm) se va reduce, la 30 m adâncime (4 atm), la 250 cm³. Normal, în căile respiratorii există o presiune (P_1) egală cu cea atmosferică, o atmosferă absolută (1 atm). Prin scufundare, asupra toracelui va acționa însă o presiune mai mare (P_2), rezultată din presiunea atmosferică plus presiunea hidrostatică la adâncimea dată. Presiunea exercitată din exteriorul toracelui devine astfel mai mare decât cea din interiorul toracelui, această diferență exprimându-se sub forma unui gradient de presiune (DP). În aceste condiții, expirul va fi favorizat prin presiunea crescută extratoracică, iar inspirul, etapa activă a ventilației pulmonare, va fi nestructurat, ceea ce conduce la creșterea în crului mecanic ventilator. Este suficientă o valoare a lui DP de 0,2 atm pentru ca inspirul să devină imposibil, ceea ce înseamnă că un om fără echipament adecvat, aflat la doar 2 m adâncime, nu mai poate respira, deoarece $DP = P_2 - P_1 = 1,2 - 1 = 0,2$ atm. Toracele este blocat în poziție expiratorie. Creșterea în continuare a adâncimii și, deci, a presiunii accentuează diminuarea volumului toracic până la poziția de expir maxim forțat și orice creștere suplimentară a presiunii va produce de acum înainte leziuni toraco-pulmonare.

Presiunea exercită efecte mecanice importante asupra urechilor și sinusurilor. În mod normal, echilibrul baric din urechea medie și sinusuri se obține prin manevra Valsalva (expiruri forțate cu gura închisă și comprimarea laterală a narinelor), care favorizează trecerea aerului din căile respiratorii în urechea medie, trompa Eustachii și în sinusuri, prin comunicările naturale. În mediul subacvatic, căile de comunicare cu exteriorul sunt blocate, echilibrarea presiunilor devenind imposibilă, ceea ce conduce la apariția barotraumei.

Presiunea hidrostatică va acționa asupra feței externe a timpanului și ea nu va putea fi echilibrată printr-o contrapresiune internă, datorită blocării trompei Eustachio. Proeminând în urechea medie, timpanul apasă asupra ciocanului, nicovalei și scăriței, provocând o creștere a presiunii endolimfei și congestia în urechea internă. Dacă presiunea crește, timpanul se rupe, se produc hemoragii în urechea medie, iar alterările din urechea internă evoluează către bipoacuzie și, prin repetarea accidentului, spre surditate. Este cazul pescuitorilor de perle și corali, care nu renunță la scufundări după ce suferă de nite sau rinofaringite.

Efectele biofizice constau, în esență, în faptul că, odată cu plonjarea subacvatică, gazele inerte (azot, heliu, hidrogen) existente în aer se dizolvă în sânge, în alte lichide din organism și în țesuturi, în funcție de presiunea lor parțială, conform legii Henry-Dalton. Presiunea gazelor dizolvate crește mai întâi rapid, apoi mai lent, tinzând spre saturație. Curba corespunzând acestei disoluții poate fi trasată experimental. Deși reprezentarea într-o ecuație a fenomenului este dificilă, se consideră că dizolvarea (în cursul scufundării) și eliminarea gazelor (la revenirea la suprafață) nu este o funcție liniară de presiune, ci urmează o lege

exponențială conform ecuației: $\frac{P}{P_0} = 1 - K^{-1}$, unde p reprezintă tensiunea gazului dizolvat, P = presiunea gazului de deasupra lichidului, l = baza logaritmilor naturali, K = un coeficient care depinde de perioada de semisaturație a țesutului respectiv ($K = \frac{\ln 2}{T}$). Fiecare țesut este caracterizat prin perioada sa T , iar, după gradul de irigație sanguină, se pot distinge țesuturi „lente” și „rapide”. Este clar că viteza de creștere a presiunii și variațiile acesteia joacă un rol esențial pe plan fiziologic prin efectul disbarismului care se stabilește între diferite țesuturi. Fiecare țesut prezintă o curbă de saturație și una de eliminare, proprii pentru gazul inert luat în considerație, iar pentru întregul organism rezultă o curbă care reprezintă suma tuturor curbelor țesuturilor izolate. Fenomenele descrise au o importanță particulară, așa cum se va vedea, în practica compresiei (scufundării) și decompresiei.

Efectele biochimice ale presiunii sunt consecința creșterii presiunii parțiale a gazelor din amestecul respirator, fiecare gaz având în aceste condiții o acțiune toxică asupra organismului.

Paul Bert a descris pentru prima dată (1873) *efectele toxice ale oxigenului* respirat la presiuni parțiale superioare de 1,7 bari, corespunzând la o presiune ce se întâlnește la 7 m. Efectul Paul Bert, sau hiperoxia, se manifestă prin greață, transpirații, amețeli, ce pot degenera în convulsii, urmate de pierderea conștienței. Se presupune că O_2 hiperbar acționează ca un toxic al sistemului nervos central, dar mecanismul de acțiune nu este clar. În expunerea prelungită la o atmosferă comprimată (mai multe zile) apare riscul toxicității cronice a oxigenului (efect Lorrain-Smith). Pentru evitarea sa, numeroase experimente au stabilit nivelul de toleranță la o presiune parțială de 0,60 bari. Altfel, plămânii suferă alterări, de la o iritație benignă, până la leziuni foarte grave.

Narcoza cu gaze inerte se constată la imersiile cu aer comprimat, fiind denumită „beția adâncurilor”, prin analogie cu intoxicația alcoolică acută. Simptomele sunt analoage cu cele din primele stadii ale anesteziilor generale, iar, dacă presiunea crește în continuare, ele evoluează către pierderea conștienței. Pentru azot, primele tulburări apar la 4,2 atm, adică la 30 m adâncime.

Fenomenele sunt explicate prin acțiunea gazelor inerte la nivelul sistemului nervos central, dar, în realitate, mecanismele moleculare nu sunt limpezi.

Efectul narcotic al diferitelor gaze inerte variază astfel: $He < H_2 < N_2 < Ar$, de unde decurge utilizarea heliului în imersiile de peste 60 m.

În cazul CO_2 , efectele toxice se exprimă diferit, în funcție de valoarea presiunii sale parțiale în aerul inspirat: până la o presiune de 0,02 bari (2% din aerul inspirat), are o acțiune stimulantă; la o presiune de 0,05 bari, difuziunea sa spre alveole este împiedicată prin lipsa unui gradient alveolo-capilar, ceea ce conduce la o acumulare a CO_2 în țesuturi, deci acidoză, cu menținerea stimulării simpatice; la 0,07 bari, predomină tonusul vagal inhibitor, exprimat prin deprimare cardio-respiratorie, vasodilatație, colaps. În practică, este importantă creșterea toxicității CO_2 cu adâncimea; de aceea, el este exclus din amestecul respirator destinat imersiilor.

La presiuni importante, devine exprimabilă și acțiunea unor agenți poluanți aflați în cantități mici în atmosferă, precum: gazele de combustie și, îndeosebi, CO, hidrocarburile, uleiurile, care trebuie extrase din amestecurile de gaze utilizate în scufundări.

La mari adâncimi, apare un sindrom nervos particular, la originea sa fiind gazele inerte, care, în locul efectului narcotic menționat anterior, au o acțiune excitantă asupra neuronilor. Aceste tulburări se previn printr-un ritm de compresie lentă, ceea ce probează eficiența mecanismelor compensatorii ale organismului. Cercetări numeroase, pe nevertebrate sau vertebrate cu sânge rece (amfibieni, pești), au probat că fibrele musculare, fibrele nervoase și sinapsele sunt foarte puțin sensibile la efectele presiunii, când gazul de compresie rămâne biologic neutru, ca în cazul heliului. În principiu, trebuie să se depășească 100 m de presiune stimulată pentru a declanșa tulburări apreciable. Totuși, omul, maimuța, pisica și rozătoarele prezintă tulburări nervoase certe de la 200–300 m profundime, după compresia rapidă în amestec heliu-oxigen. Brauer și colab., în urma unui studiu comparativ, subliniază că sensibilitatea la presiune a unei structuri nervoase este cu atât mai mare, cu cât este mai complexă și, deci, superior situată în clasificarea vertebratelor. Implicit, aceasta înseamnă punerea în joc de neuroni mai numeroși, asociați în lanțuri și activități complexe. De aici ar rezulta ipoteza că tulburările celulare, inițial minore, sunt sumate în structura nervoasă. Ipoteza pare confirmată de grupul de cercetători din Marsilia, care, în scufundări efectuate la 300–1 000 m de către 20 de subiecți, a probat că reflexele mnosinaptice nu erau alterate. Dimpotrivă,

reflexele care implică o rețea locală de neuroni și, deci, de sinapse erau alterate. Avansându-se explicația, este posibil ca presiunea să altereze configurația externă a membranei și, deci, proprietățile macromoleculor situate la acest nivel sau chiar stabilitatea organizării lipoproteice a membranei. Este posibil ca, prin aceeași presiune, să fie modificate structura apei sau hidratarea ionilor citoplasmatici, ceea ce înseamnă că limpezirea efectelor presiunii devine și o problemă de biofizică moleculară și celulară.

Efectelor enumerate foarte succint anterior, li se adaugă, în apă, și *deperdiția calorică*, consecință a frigului, împotriva căruia organismul are cele mai reduse posibilități de adaptare naturală. Dacă în aer un om dezbrăcat este în neutralitate termică la 28°C, în apă fără curenți sunt necesare 33°C, datorită căldurii specifice și conductibilității termice mari ale apei. Pierderea calorică depinde de temperatura apei și de curenți, iar, la adâncimi mari, temperatura apei este scăzută, indiferent de latitudine. Organismul posedă o serie de mecanisme ce se opun deperdiției calorice, descrise în acest capitol în secțiunea referitoare la mecanismele adaptării termice. Limitele rezistenței omului în apă rece sunt restrânse: un înotător suportă o temperatură a apei de 15°C, iar, pentru omul îmbrăcat, timpul de supraviețuire este de: 10 minute, în apă, la -3°C; 30 de minute - 1 h, la 0°C și 30 de minute - 3 h, în apă, la 5°C. În aceste condiții, consecutiv suprasolicitării mecanismelor termoreglării, apare starea de șoc, urmată de pierderea conștienței, hipotermie, congelare și moarte. Împiedicarea pierderii calorice de către organism reprezintă un obiectiv important în prelungirea lucrului în apă.

21.6.4. PROBLEMELE ESENȚIALE ALE IMERSIEI

Prevenirea fenomenelor descrise anterior se impune în cazul pătrunderii subacvatice a omului, ca scafandru.

Problema principală constă în *realizarea respirației subacvatice*, pentru rezolvarea căreia s-au propus mai multe soluții, dintre care două s-au impus în practică, prima aplicabilă în cazul scafandruului greu, iar cea de-a doua în cazul scafandruului autonom, sau ușor. Inițial, s-a imaginat, pentru scafandruul greu, un tub rigid cu unul din capete situat deasupra apei, soluție inoperantă, deoarece de la o adâncime de 2 m respirația devine imposibilă. Dacă însă prin tub se trimite de la suprafață aer pompat la o presiune egală cu cea hidrostatică la adâncimea de staționare, prin dispariția diferenței de presiune respirația devine din nou posibilă. Practic, instalația de presurizare a aerului se află în ambarcațiunea de la suprafață, iar aerul este trimis printr-un tub în casca scafandruului. Aerul expirat se elimină în apă printr-o supapă unidirecțională, cu care este prevăzută casca. Prin acest sistem, scafandruul conservă gura, nasul și ochii liberi în interiorul căștii rigide; el vorbește și respiră normal. Există și sisteme neautonome cu circuit semiînchis, în care gazele expirate nu sunt complet eliminate la exterior, trecând într-un rezervor suplă, unde sunt regenerare (debarasate de CO₂), apoi reinspirate. Se reduce, astfel, consumul de gaze.

Scafandrii autonomi sunt înzestrați cu diferite tipuri de aparate pentru respirația subacvatică. Rezerva de aer sub presiune este conținută în butelii pe care acvauatul le transportă cu sine. Autonomia depinde de mărimea rezervorului, dar și de adâncime și de subiectul utilizator. Un sistem celebru cu circuit deschis este cel imaginat de Cousteau și Gagnon, prin care se debitează aer numai în inspir și care prezintă avantajul menținerii în permanență a căilor respiratorii în echilibru baric cu mediul înconjurător. Sistemele cu circuit semiînchis conțin un amestec sintetic fie de O₂-N₂ sau de O₂-He, al cărui conținut în oxigen este determinat în funcție de profunzimea la care se lucrează; amestecul ajunge într-un sac suplă, care stabilește echilibrul de presiune între plămâni și apă. În cazul circuitelor închise, două butelii de gaz (O₂ și un gaz neutru, N₂ sau He) furnizează într-un sac suplă un amestec al cărui conținut în O₂ este controlat automat în toate fazele plonjării. Instrumentul de control al O₂ (captor) este conectat cu un servo-amplificator, ce comandă închiderea sau deschiderea unui jgheg, aducând într-un timp foarte scurt presiunea parțială la valoarea sa stabilită în prealabil. În toate aparatele cu circuit semiînchis și închis, gazele expirate sunt reciclate și debarasate de CO₂ printr-un cartuș depurator. Aparatul cu circuit închis este cel mai performant, asigurând un maximum de autonomie, teoretic până la 500-600 m adâncime.

În ceea ce privește *compoziția amestecului respirator* de gaze utilizat, aerul este contraindicat, deoarece, prin creșterea importanței a densității sale la adâncimi, mărește lucrul ventilator. Se preferă amestecuri respiratorii sintetice conținând heliu, deoarece ele își măresc mai puțin densitatea. Heliul

servește la menținerea normoxiei; astfel, cu creșterea adâncimii, proporția O₂ trebuie să scadă pentru menținerea presiunii sale parțiale inițiale. Folosirea amestecurilor conținând heliu, în special heliu și oxigen („heliox”), previne și pericolul narcozei de adâncime, deoarece He prezintă cea mai mică putere narcotică dintre toate gazele rare.

Frigul constituie un handicap sever pentru scafandru, îndeosebi când acesta efectuează un efort de durată. Până în prezent au fost adoptate în scopul protecției termice două soluții: (a) utilizarea unui costum din lână, izolat de apă printr-un alt costum etanș, aerul din încălțăminte contribuind la menținerea temperaturii; (b) ajustarea pe corpul scafandruului a unui costum suplă de neopren, de 4-6 mm grosime; acest costum ou este etanș, dar pelicula de apă filtrată ajunge rapid la temperatura corpului, iar grosimea neoprenului asigură izolarea termică.

În plonjarea profundă cele două soluții nu mai sunt operante, deoarece heliul, gaz cooductor, nu are puterea izolantă a aerului, în cazul primului tip de costum, iar neopreoul este comprimat sub influența presiunii, protecția sa termică devenind astfel nulă.

Această problemă crucială este tratată în prezent în două maniere diferite: (a) utilizarea unui prim strat de îmbrăcăminte încălzită cu o rețea de rezistențe electrice; (b) izolarea scafandruului într-o „pungă” de apă caldă, cu un înveliș extern rezistent și un înveliș intern din cauciuc, care se mulează pe corp; apa caldă este introdusă între cele două învelișuri.

O eroare, prevenită doar recent, constă în considerarea exclusivă a deperdițiilor calorice de la nivelul epidermei. În realitate, există importante pierderi prin ciclul respirator, proporționale cu presiunea amestecului respirator și accentuate de marea conductibilitate termică a heliului prezent în amestec. De aceea, în afară de încălzirea corpului scafandruului este necesară și reîncălzirea amestecului gazos pe care acesta îl inspiră.

Dacă vocea umană în aer comprimat se modifică puțin, ea se deformează profund în cazul vorbirii în amestecul gazos oxigen-heliu. Fenomenul se explică prin decalarea în aerul artificial a frecvențelor și amplitudinilor relative ale vocii umane, determinată de creșterea densității mediului aeric și de viteza sunetului în heliu. Or, incapacitatea de comunicare a scafandruului reprezintă un handicap serios, atât în randamentul de lucru, cât și în securitatea sa. De aceea, se utilizează în prezent dispozitive de corectare a vocii, cu o eficiență satisfăcătoare.

În sfârșit, un aspect fundamental al pătrunderii subacvatice a omului este ritmul optim al plonjării. Dacă ne referim la timpul necesar pentru saturarea cu heliu a diferitelor țesuturi din organism, acesta este scurt, fiind seama de efectele de distribuire a circulației sanguine. Presiunea provoacă însă, în scurt timp, o serie de tulburări moleculare și celulare. Prin mecanisme homeostazice de compensare, activitatea celulară tinde să se mențină, dar această adaptare necesită un oarecare interval de timp. Când compresia este rapidă, dezordinea domină procesul compensator. O serie de experimente au permis stabilirea unor scheme optime pentru compresia lentă, determinând eliminarea accidentelor și diminuarea tulburărilor la scafandri.

21.6.5. PROBLEMA DECOMPRESIEI

Când plonjorul urcă spre suprafață, presiunea hidrostatică care se exercită asupra organismului diminuează și, concomitent, se reduce presiunea gazului respirat și tensiunea gazelor dizolvate în sânge. Tensiunea gazelor dizolvate în țesuturi țide, de asemenea, să diminueze, dar acest proces se produce cu o întârziere variabilă, funcție de tipul țesutului. La un moment dat, tensiunea gazelor dizolvate în țesuturi devine superioară celei a gazelor dizolvate în sânge. Aceasta este starea de suprasaturație, iar fiecare țesut are un anumit coeficient de suprasaturație critică. Dacă urcarea spre suprafață este prea rapidă, echilibrul instabil al gazelor în stare de suprasaturație este rupt și apar bule de gaz, care produc tulburări cunoscute sub numele de „boala de decompresie”. Accidentele sunt deosebit de periculoase și, netratate, evoluează către artrite, paralizii definitive sau deces. Circa 60% din accidente au o expresie neurologică, prin localizarea embolilor gazoși, constituții de bule, la nivelul arterelor măduvei spinării, ca urmare a unei particularități de vascularizație de la acest nivel. Singurul tratament eficient al bolii de decompresie este introducerea accidentatului în barocameră, recompresia sa pentru redizolvarea bulelor de gaz și, apoi, decompresia lentă, conform unor tabele terapeutice de decompresie.

Dacă viteza de revedere la suprafață este suficient de lentă, gazele dizolvate în țesuturi trec în sânge, care le drează în plămâni, unde ele se elimină. Decompresia lentă se obține fie prin scăderea continuă a presiunii (urcare continuă), liniar sau exponențial (decompresie computerizată), fie prin scăderea discontinuă a presiunii sau urcarea în trepte. Ultima metodă se folosește cel mai frecvent. Au fost calculate tabele de decompresie pentru aer și amestecurile respiratorii, în care sunt înscrise timpurile de decompresie pentru fiecare treaptă. Scafandru memorează timpurile și adâncimile palierelor de decompresie, în funcție de adâncimea și timpul de lucru, urmând ca, la revenirea spre suprafață, să respecte cu rigoare toți timpurile de decompresie.

În ultimii ani, s-a abordat studiul efectelor stresului gravitațional la nivel celular, în mod particular răspunsul de la nivel renal. Consecutiv creșterii artificiale a forței gravitaționale, s-a demonstrat clar descreșterea excreției renale de sodiu și apă. Simultan, s-a observat la nivelul plasmă creșterea nivelurilor arginine-vasopresinei, activității reninei, aldosteronului, norepinefrinei și scăderea concentrației de peptid atrial natriuretic. Dimpotrivă, în condițiile scăderii stresului gravitațional, excreția renală de sodiu și apă crește cu 100–400%, iar concentrațiile moleculelor menționate anterior variază în sens invers. Au fost propuse câteva modele experimentale care pot furniza date utile în investigarea fiziologiei și fiziopatologiei reglării volumului celular.

21.6.6. ALTERNATIVE ȘI METODE DE INTERVENȚIE SUBMARINĂ

În esență, se practică trei forme de intervenție submarină: plonjarea ușoară, plonjarea cu turelă și plonjarea la saturație.

Plonjarea ușoară se face prin coborârea scafandruului cu propriile mijloace. Aparatul respirator este autonom sau aerul poate proveni de la suprafață printr-un cordon. Palierii de decompresie, la revenire, se efectuează direct în apă. Metoda este simplă și rapidă, iar limitele de scufundare permise se situează la 60–70 m, când se utilizează aer, și la 100 m, în cazul amestecului oxigen-heliu.

Plonjarea cu turelă este tipul caracteristic al interveției submarine moderne. Plonjorul nu mai coboară prin mijloace proprii și utilizează o turelă cu ascensor, sau bază de repaus pe fundul apei, în timpul lucrului. Pătrunderea în turelă se face la presiune atmosferică, iar, când imersia s-a terminat, scafandru presurizează interiorul turelei până la echilibrul hidrostatic cu exteriorul. Prin deschiderea uorii panou ei ies din iocintă și, după terminarea lucrului, revin. Când imersia este scurtă, turela poate fi utilizată pentru decompresie. Cel mai frecvent însă, se preferă revenirea la suprafață în turelă și apoi utilizarea unui cheson de decompresie. Metoda este utilă până la adâncimi de 150–180 m.

Plonjarea la saturație devine utilă la adâncimi de peste 60–70 m, când se lucrează un timp îndelungat în apă. Cel mai frecvent se coboară într-un cheson de suprafață, presurizat la presiunea adâncimii atinse. Se poate rămâne, astfel, zile sau săptămâni, în cheson existând condiții de relativ confort (dormit, hrană, lectură, muzică, televiziune). Pentru comunicarea cu suprafața se utilizează torela. O extindere a acestui sistem este locuința imersată, sau „casa sub mare”, care reprezintă o autentică locuință submarină, angajând o importanță și costisitoare infrastructură.

Determinată de motive economice și științifice, explorarea submarină are toate șansele să se extindă. De aceea, studiul adaptării organismului uman la viața și lucrul subacvatic este de actualitate, iar deocamdată se cunosc bine mai ales elementele legate de practica imersiei (compresiei) și a revenirii la suprafață (decompresiei). Rămân încă de cercetat modificările de la nivel celular produse de presiunile mari; datele obținute astfel vor oferi noi deschideri în cucerirea hidrospatiului, comparată, neori, ca anvergură și importanță, cu cea a cosmosului.

21.7. ELEMENTE DE FIZIOLOGIE A EFORTULUI

Deși o mare parte din reacțiile neuro-endocrine produse de efort, ca factor de menținere și consolidare a sănătății, au fost menționate la capitolele consacrate diverselor funcții ale organismului, ele vor fi succint redate, pentru a oferi o idee de ansamblu asupra principalelor adaptări somato-vegetative și metabolice produse de solicitările fizice sau psihice de diferite tipuri și grade. Acestea reprezintă variații de la starea

de repaus, ca termen de referință a normalității. Cu mici excepții, atât funcțiile, cât și constantele biologice ale organismului variază în efort în limite destul de largi, fără a depăși granițele normalului. Asemenea variații adaptative se întâlnesc mai ales în cazul efortului fizic de performanță. Acesta determină reacții neuro-umorale de adaptare din partea întregului organism, începând cu sistemul nervos somatic, coordonator al motricității voluntare, și sfârșind cu funcțiile vegetative (cardio-vasculară, respiratorie) și endocrino-metabolice, indispensabile asigurării substratului energetic al contracției musculare.

La rândul lor, suprasolicitățile psiho-emoționale se îsoțesc de reacții somato-vegetative de diferite grade, reprezentate de fenomene de încordare sau de presiune neuro-psihică, de predominanță simpatică (tahicardie, vasoconstricție, paloare, transpirații) sau parasimpatică (spasme intestinale, defecație, micțiune, aritmie sau chiar stop cardiac), întregite sau induse de descărcări hormonale multiple (adrenalină, glucocorticoizi, hormoni tiroidieni, gonadali etc.). Intensitatea și durata acestor reacții condiționează performanțele fizice sau psihice, dependente, la rândul lor, de tipul de efort, rezervele energetice și rezistența organismului dobândită prin antrenament și experiență anterioară.

21.7.1. PARTICULARITĂȚI ALE CONTRACTILITĂȚII MUSCULARE ÎN EFORT

Contracțiile musculare generatoare de efort fizic dau naștere unei forțe realizate cu consum de energie, care este în funcție de volumul masei musculare active, de intensitatea forței dezvoltate și de durata contracției rezultate. Cu cât musculatura scheletică va fi mai dezvoltată, cu atât și forța contractilă a acesteia va fi mai mare.

Forța contractilă maximă variază între 2,5 și 3,5 kg pe cm² de masă musculară. Lucrul mecanic rezultat din contracția întregii musculaturii striate poate atinge, la un atlet antrenat, până la 7 000 de kilogrammetri pe minut (kg·m/min), în primele 10–15 secunde de efort. Raodamentul contracțiilor scade în minutul următor, la aproximativ 4 000 kg·m/min, pentru ca, după jumătate de oră de efort, să se reducă până la 1 500–1 700 kg·m/min, odată cu epuizarea rezervelor energetice.

Forța musculară de fixare este cu 40% mai mare decât cea de contracție.

Intensitatea și durata efortului depind în ambele cazuri de predominanța fibrelor musculare albe, cu contracție rapidă, sau roșii, cu contracție lentă, precum și de rezervele de glicogen și acizi grași ale musculaturii scheletice. Cele două tipuri de fibre striate diferă atât din punct de vedere metabolic, cât și funcțional.

Astfel, fibrele contractile rapide dispun de un echipament enzimatic glicolitic predominant anaerob, de 2–3 ori mai activ decât al fibrelor musculare cu contracție lentă, ce asigură eliberarea promptă a energiei de contracție. La rândul lor, fibrele cu contracție lentă, conținând mai multă mioglobină și mitocondrii, prezintă un metabolism energetic predominant aerob.

Datorită acestor particularități, fibrele musculare cu contracție rapidă eliberează mari cantități de energie contractilă pentru perioade scurte de timp, iar fibrele cu contracție lentă asigură activitatea contractilă de lungă durată. La rândul său, fatigabilitatea este mult mai mare la primele decât la ultimele. Majoritatea mușchilor sunt de tip mixt. Rezistența la efort depinde însă nu numai de durata și intensitatea acestuia, ci și de tipul efortului prestat.

21.7.2. TIPURI DE EFORT FIZIC

Efortul fizic poate fi dinamic sau static, după cum forța contractilă dezvoltată produce sau nu mișcare, deplasare sau altă formă de lucru mecanic.

Când forța dezvoltată de contracția musculară determină deplasarea punctului său de aplicare, provocând actul motor de mișcare, suntem în prezența unui efort dinamic, denumit și izotonic, întrucât are la bază scurtarea fibrelor musculare. Lucrul mecanic rezultat se realizează în acest caz cu participarea predominantă a metabolismului energetic aerob.

Când forța musculară dezvoltată de contracție nu produce deplasare sau mișcare, fie din cauza iocapacității de mobilizare a sarcinii, fie că aceasta este acuată de o forță antagonică echivalentă, este vorba de activitatea musculară statică. Efortul static, neînsoțindu-se de modificări importante ale formei și

lungimii mușchiului, generatoare de lucru mecanic, se mai numește și izometric, sau rezistiv. Spre deosebire de efortul dinamic, în care energia contractilă este furnizată de metabolizarea aerobă atât a glucidelor, cât și a lipidelor cu consum de oxigen, energia necesară realizării efortului static este asigurată de glicoliza anaerobă.

Reacțiile adaptative cardio-vasculare și respiratorii diferă, de asemenea, în cele două tipuri de efort, fiind mai atenuate în cazul efortului static, decât al celui dinamic (fig. 21.6).

În efortul static intens, circulația sângelui în mușchii contractați fiind redusă sau oprită de blocajul cuștii toracice în inspir, contracția musculară nu poate fi menținută mult timp. Ea este urmată de creșterea fluxului sanguin local, a întoarcerii venoase, a debitului cardiac și a ventilației pulmonare, în vederea îndepărtării cataboliților acizi rezultați din metabolismul anaerob muscular. În comparație cu efortul static, atât cheltuielile energetice, cât și reacțiile adaptative organo-vegetative și endocrino-metabolice din efortul dinamic sunt mult mai intense.

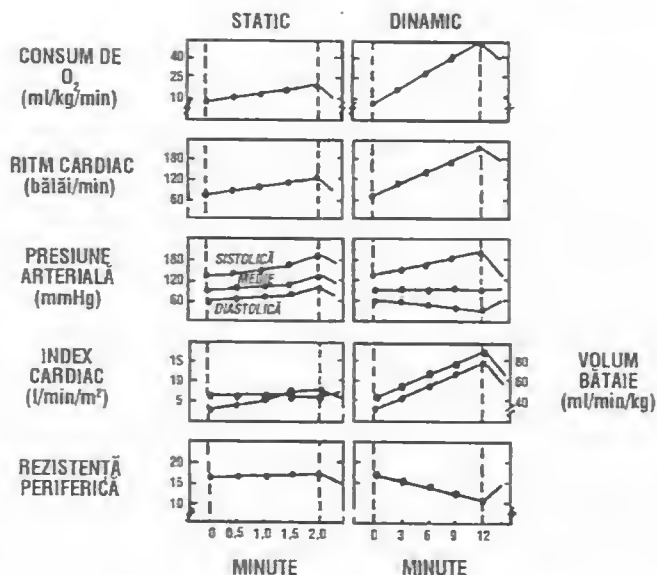


Fig. 21.6. Efectele cardio-vasculare ale efortului acut static și dinamic.

21.7.3. CHELTUIELILE ENERGETICE ÎN EFORT

Intensitatea cheltuielilor energetice în efort poate fi apreciată în funcție de consumul de oxigen raportat la unitatea de timp și exprimată sub formă de echivalent metabolic (MET = O₂ ml consumat/kg corp/min). Un MET este egal cu 3,5 ml O₂/kg corp/min sau cu 1, 2 calorii/min și reprezintă energia necesară acoperirii nevoilor metabolice ale organismului în condiții bazale de repaus.

Nivelul cheltuielilor energetice este de 3-5 MET în efortul ușor, corespunzând la 11-18 O₂ ml/kg corp/min sau la 4-6 kcal/min. În efortul moderat, cheltuielile energetice ating 5-7 MET sau 18-25 ml O₂/kg corp/min (6-8 cal/min) și 7-9 MET (23-32 O₂/kg corp/min), corespunzător la 8-10 kcal/min în efortul greu.

În cazul eforturilor foarte grele, MET crește peste 10 și, respectiv, 32 ml O₂/kg corp/min sau 12 O₂/kg corp/min.

După calea de eliberare a energiei chimice din timpul efortului fizic, aceasta este de tip anaerob și aerob sau mixt.

Înmulțind volumul de oxigen consumat cu echivalentul caloric al acestuia, a cărui valoare medie este de 4,8, se obține cheltuiala de energie, exprimată în calorii. Aceasta variază în funcție de tipul și intensitatea efortului. În efortul fizic moderat, de pildă, cheltuielile energetice ale unui adult de 70 kg depășesc de 2-3 ori valorile de repaus. Consumul de O₂ crește de la 250 ml/min până la 750-800 ml/min (5 kcal/min), realizând, în 8 ore de lucru, cheltuieli energetice de 1 900-2 200 kcal. Împreună cu cele 500 kcal din timpul somnului și 1 200 din afara efortului, cheltuielile energetice zilnice din efortul fizic moderat pot atinge 3 800 kcal.

În efortul greu al muncitorilor manuali, cheltuielile energetice sunt de 5-8 ori mai mari decât cele din repaus, iar consumul de O₂ variază între 1 și 2 litri pe minut (până la 9 kcal/min). În cele 8 ore de lucru ale adultului de 70 kg, se ajunge la un necesar energetic de aproximativ 4 200 kcal, însumând până la 6 000 kcal în 24 de ore. În condițiile efortului maximal al sportivilor de performanță, cheltuielile energetice pot fi și mai mari, ducând în caz de suprasolicitare la epuizarea rezervelor de hidrocarbonate, urmată de hipoglicemie, hipertermie, acumularea de cataboliți acizi și insuficiență circulatorie, fenomene anormale ce impun întreruperea efortului respectiv.

21.7.4. SURSE ENERGETICE ÎN EFORT

Bazele electro-chimice și moleculare ale contracției musculare au fost prezentate deja la capitolul de fiziologie a aparatului locomotor.

Principala sursă de energie pentru contracția musculară este ATP. Legăturile macroergice ale ultimilor doi radicali fosfat ai acestuia sunt înalt energetice. Îndepărtarea fiecăruia dintre aceștia se soldează cu eliberarea a 11 000 de calorii (11 kcal) disponibile pentru contracția musculară. Din păcate, cantitatea de ATP prezentă în mușchi asigură energia de contracție maximală numai pentru 5-6 s, chiar și la sportivii bine antrenaji. De aceea, este necesar ca ATP să se formeze continuu, printr-una din cele trei căi metabolice responsabile de refacerea sa la nivel muscular. Aceste căi sunt reprezentate de: sistemul fosfagen, sistemul anaerob glicogen-acid lactic și sistemul aerob de degradare a glucozei, acizilor grași și unor aminoacizi (fig. 21.7).

Sistemul energetic fosfagen este reprezentat de ATP și fosfocreatină. ATP reprezintă sursa energetică de bază, a cărei descompunere în ADP și apoi în AMP pune în libertate mari cantități de energie indispensabilă contracției musculare. Degradarea ATP și eliberarea energiei stocate în legăturile macroergice ale acestuia se realizează sub influența ATPazei miozinice. În afara contracției musculare, consumul de ATP este minim. Acesta crește de cel puțin 150 de ori în timpul contracțiilor maxime, ducând la defosforilarea și epuizarea în câteva secunde a ATP muscular disponibil, evaluat la aproximativ 4 mM. ADP rezultat este rapid refosforilat pe mai multe căi.

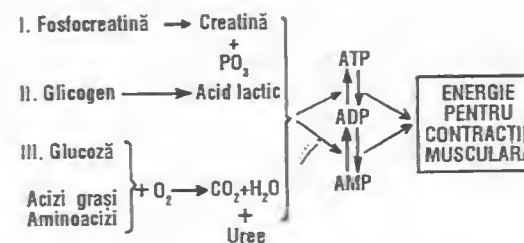


Fig. 21.7. Sistemele energetice ale contracției musculare.

Prima cale de refacere a ATP este reprezentată de *fosfocreatină*, al cărei radical fosfat stochează aproximativ 13 000 de calorii (13 kcal) per mol. Cum conținutul în fosfocreatină al musculaturii striate este de 3-5 ori mai mare decât în ATP, în momentul când acesta începe a fi consumat se produce scindarea promptă a fosfocreatinei de către creatin kinază și transferul radicalului său fosfat la ADP, în vederea formării de ATP.

Fenomene inverse de sinteză a fosfocreatinei au loc în prezența excesului de ATP cu ajutorul unei transferorilaze specifice.

Această relație reversibilă dintre fosfocreatină și ATP face din prima principalul depozitar de energie, iar din ATP, o adevărată monedă energetică. Cuplul ATP-fosfocreatină, comportându-se ca un veritabil sistem energetic tampon în stare de echilibru, asigură concentrația relativ constantă a ATP muscular pentru perioade scurte de efort maximal (10-15 secunde) (fig. 21.8).

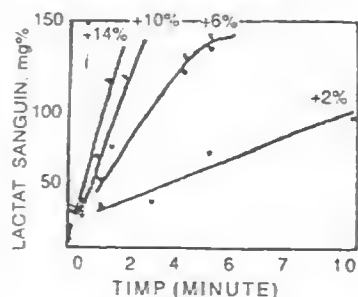


Fig. 21.8. Concentrația lactatului în funcție de durată și intensitatea efortului.

Sistemul glicogen-acid lactic asigură energia derivată din glicoliza anaerobă. Glucoza fiind principalul nutriment utilizat ca sursă energetică fără participarea oxigenului, degradarea sa glicolică până la stadiul de acid piruvic determină formarea a 2 molecule de ATP pentru fiecare mol de glucoză consumată. Când glucoza provine din depolimerizarea glicogenului, randamentul energetic al glicolizei anaerobe este de 3 molecule de ATP. Diferența de o moleculă de ATP se datorește faptului că în timp ce glucoza, ca atare, consumă o moleculă de ATP pentru fosforilare înainte de a suferi degradarea glicolică anaerobă, cea rezultată din depolimerizarea glicogenului intră în glicoliză sub formă deja fosforilată. De aceea, cea mai bună sursă de energie în condiții anaerobe este glicogenul celular. Acidul piruvic rezultat este convertit în lipsa oxigenului în acid lactic, care difuzează din celulele musculare în lichidul interstițial și sânge, contribuind la acidifierea acestora și la apariția fenomenului de oboseală.

În general, sistemul glicogen-acid lactic realizează sinteza ATP de 2,5 ori mai repede decât mecanismul oxidativ mitocondrial.

El servește ca sursă rapidă de energie, asigurând necesarul energetic pentru 30-40 s de activitate musculară maximală.

Sistemul aerob realizează degradarea glucozei, a acizilor grași și a unor aminoacizi la nivel mitocondrial, cu participarea obligatorie a oxigenului. Intrate prin intermediul acidului piruvic și acetil coenzimei A în ciclul acizilor tricarboxilici (ciclul Krebs), cele trei surse energetice suferă procese de dehidrogenare și decarboxilare succesivă, în vederea eliberării energiei lor potențiale și depunerii sale în legăturile macroergice ale ATP. În prezența oxigenului, au loc reacții de oxidare a atomilor de hidrogen, întregite de degajarea unor mari cantități de energie, care sunt folosite la conversia AMP și ADP în ATP.

Procesul simultan de fosforilare oxidativă asigură formarea a 3 molecule de ATP pentru fiecare atom de oxigen activat la nivelul lanțului transportor de electroni al glicolizei aerobe. Degradarea aerobă a glucozei în ciclul acizilor tricarboxilici generează 36 de molecule de ATP, pentru fiecare mol de glucoză utilizată la nivel celular. În condițiile unui aport nutritiv corespunzător, sistemul aerob asigură energia necesară efectuării eforturilor de lungă durată. Randamentul reacțiilor oxido-reductoare aerobe, exprimat în ATP rezultat, este însă mai mic decât al celorlalte două căi energetice. Spre deosebire de sistemul fosfagen, care generează 4M de ATP/min, sau de glicoliza anaerobă, din care rezultă 2,5 M de ATP/min, sistemul aerob degajă doar 1 M de ATP/min. În schimb, durata reacțiilor energogene aerobe este nelimitată în prezența unor cantități adecvate de

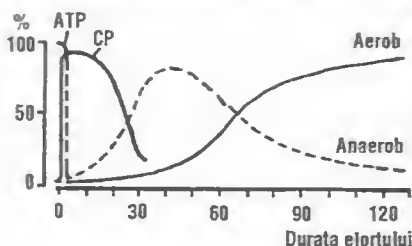


Fig. 21.9. Contribuția ATP, creatin fosfatului (CP), glicolizei anaerobe și aerobe la asigurarea energiei de contracție.

substrat și oxigen. Ele asigură substratul energetic al eforturilor prelungite (probe sportive de 2 000, 5 000, 10 000 de metri, maratoe etc.), în timp ce sistemele fosfagen și glicolitic anaerob satisfac necesitățile energetice de scurtă durată, cum sunt: alergarea de 100 de metri, saltul, ridicarea greutății etc. În general, cele trei sisteme furnizoare de energie contractilă își întregesc aportul energen, contribuind simultan sau succesiv la acoperirea necesităților energetice variabile ale contractilității musculare în efort (fig. 21.9).

Refacerea potențialului energetic al sistemului aerob se realizează în două faze, una de durată scurtă și alta de lungă durată. Faza de scurtă durată a refacerii este de aproximativ 1 oră și depinde de datoria de oxigen contractată în timpul efortului. Aceasta este cantitatea suplimentară de oxigen care trebuie introdusă în organism după terminarea efortului, în vederea restabilirii echilibrelor metabolice și funcționale de repaus. Plata datoriei de oxigen se face în două etape: alactacidă, cu durată de 2-3 minute, și lactacidă, cu evoluție lentă, de cel puțin o oră. În timp ce datoria alactacidă este de 3,5 l O₂, cea lactacidă are o valoare de peste 8 l O₂ (fig. 21.10).

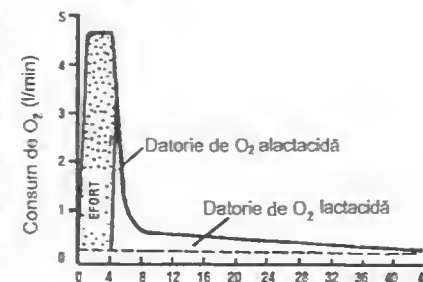


Fig. 21.10. Plata datoriei de O₂.

La rândul său, refacerea de lungă durată privește restabilirea stocului de glicogen muscular. Ca principală sursă energetică, glicogenul face oficiul de substrat atât în glicoliza anaerobă, cât și în cea aerobă. Refacerea sa durează ore sau zile, în funcție de aportul de glucide sau lipide alimentare, fiind mai rapidă în cazul unui regim bogat în hidrocarbone.

Factorii care condiționează capacitatea de efort și refacere a potențialului energetic la nivelul musculaturii în stare de hiperactivitate sunt, în linii mari, următorii:

- funcția cardio-pulmonară de preluare și transport al gazelor sanguine (debit respirator, debit cardiac, difuziune, fixare și transport sanguin etc. (fig. 21.11);

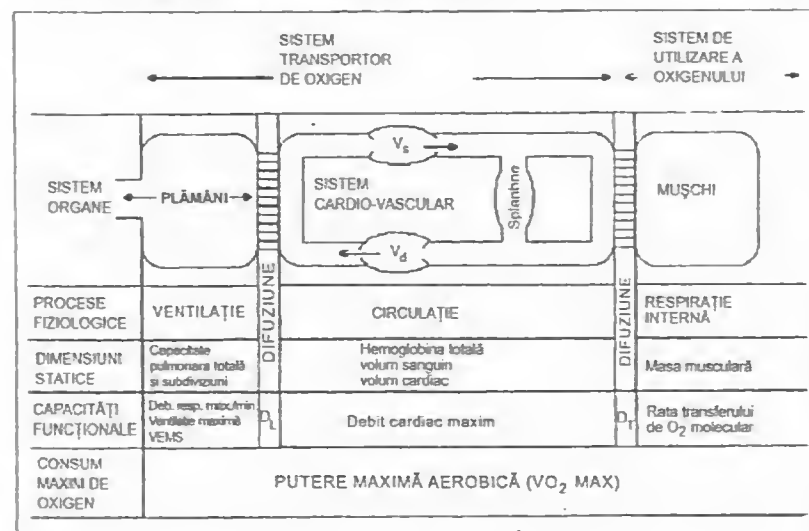


Fig. 21.11. Schema capacității de transport a oxigenului.

- factorii neuro-umoral de activare a circulației generale și regionale;
- rezervele energetice și metabolizarea lor aerobă și anaerobă;
- tipul, intensitatea și durata efortului;
- factorii ambientali (temperatură, umiditate, lumină, zgomot, hipo- sau hiperbarism etc.);
- reacțiile neuro-endocrino-metabolice de adaptare sau dezadaptare (anrenament, sedentarism, aclimatizare, oboseală etc.).

21.7.5. REACȚII FIZIOLOGICE ÎN EFORT

Reacțiile adaptative ale organismului la efort depind atât de tipul, intensitatea și durata acestuia, cât și de sex, vârstă, ambianță și gradul de antrenament.

Ele sunt dominate de răspunsuri cardio-respiratorii și neuro-endocrino-metabolice de diferite grade, în vederea satisfacerii necesităților energetice ale musculaturii în stare de activitate, îndepărtării produșilor toxici de metabolism celular și disipării căldurii degajate în timpul activității contractile.

Reacții cardio-vasculare. Deoarece rezervele celulare de oxigen satisfac necesitățile de efort numai câteva secunde, una din primele reacții o constituie creșterea fluxului sanguin la nivelul musculaturii în stare de activitate. Fenomenul se datorește atât vasodilatației locale, produsă de hipoxie, potasiu și hidrogen-ioni, cât și descărcărilor simpatiche centrale, care pot chiar anticipa începerea efortului. Ca urmare a rezistenței reduse la flux și a activității contractile a mușchilor, rezultă activarea întoarcerii venoase din patul muscular activ, urmată de creșterea umplerii diastolice, forței de contracție a inimii și volumului-bătăie. Pe de altă parte, descărcările adreno-simpatice, dublate de scăderea tonusului parasimpatic stimulează contractilitatea și frecvența cardiacă, contribuind la creșterea debitului cardiac de la 5–6 l/min, până la 30 l/min. De remarcat că acesta crește în timpul efortului mai mult pe seama frecvenței cardiace la neantrenați și a volumului-bătăie la sportivi bine antrenați. În timp ce volumul-bătăie al neantrenaților crește doar cu 50% (de la 70–75, la 105 ml), ritmul cardiac prezintă creșteri de până la 250% (de la 75, până la 185 de bătăi/minut).

La sportivi de performanță, din contră, se constată valori mai mari cu 40–50% ale volumului-bătăie de repaus și dublarea acestuia în timpul efortului maximal, însoțită de creșteri moderate ale ritmului cardiac. Acesta prezintă valori mai mici în repaus la sportivi bine antrenați. La rândul său, mușchiul cardiac apare hipertrofiat și cu o densitate mai mare a mitocondriilor, favorizând extracția oxigenului și mărirea cu aproximativ 40% a cavităților inimii.

Paralel cu creșterea volumului-bătăie, urmată de cea a debitului cardiac, fenomenele de predominanță simpatico-adrenergică determină vasoconstricție în teritoriul splanhnic, succedată de comutarea masei sanguine circulante spre musculatură în stare de activitate. Tendința la creșterea a presiunii arteriale în timpul efortului fizic contribuie la distensia și reducerea rezistenței vaselor din mușchii în stare de activitate și la potențarea vasodilatației metabolice de la nivelul acestora. Datorită factorilor locali și generali de activare a circulației, fluxul sanguin muscular poate crește de 15–25 de ori în efortul dinamic maximal la sportivi bine antrenați. În timpul contracției puternice și continue, fluxul sanguin local poate, din contră, scădea, ducând la instalarea stării de oboseală, ca urmare a deficitului de oxigen și nutrimente.

Reacții respiratorii. Intensificarea metabolismului energetic determină reacții adaptative respiratorii cuplate cu cele cardio-vasculare, în vederea asigurării aportului de oxigen și eliminării de CO_2 . Acestea constau în creșterea rapidă a ventilației pulmonare și a debitului respirator, pe seama intensificării frecvenței și amplitudinii respirației.

Frecvența respirațiilor crește de la 12–16/min, până la 30–40/min în efortul moderat, iar volumul respirator curent de 500 ml în repaus poate atinge 1,5–2,3 l în efortul maximal. Ca urmare a intensificării frecvenței respiratorii și a volumului curent, debitul respirator crește de la 5–6 l, la 20–30 l/min, în funcție atât de tipul și intensitatea efortului, cât și de gradul antrenamentului. Pentru perioade scurte de timp, debitul respirator poate ajunge până la valori maxime de 110–120 l/min la sportivi de performanță. În schimb, capacitatea vitală prezintă creșteri modeste doar în efortul intens, pe seama volumului curent mărit (fig. 21.12). Capacitatea funcțională reziduală crește, de asemenea, datorită valorilor mai mari ale volumului rezidual.

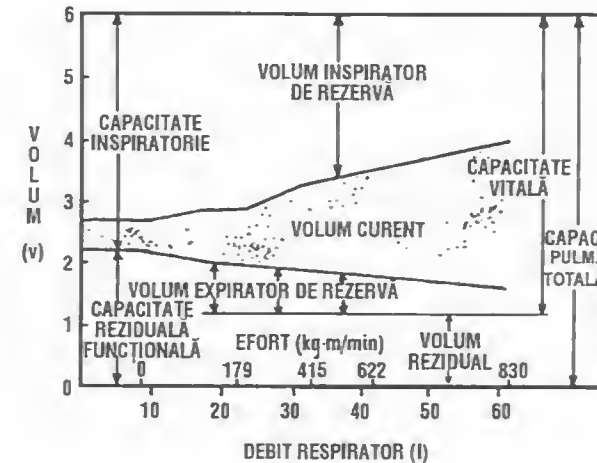


Fig. 21.12. Influența intensității efortului asupra volumului curent.

Creșterea capacității funcționale reziduale asigură reducerea fluctuațiilor presiunii parțiale alveolare a CO_2 și aportul corespunzător de O_2 la nivelul suprafeței de schimb capilar.

În general, frecvența respirației crește mai rapid decât volumul ventilator.

Solicitările fizice crescând intensifică travaliul respirator al diafragmului și mușchilor inspiratori, în general, asigurând depășirea rezistențelor statice și dinamice la flux, provocate de accentuarea turbulenței aerului. Intensificarea exagerată a ventilației în eforturile intense la neantrenați este însă neeconomică, din cauza vehiculării aerului în spațiul mort al căilor respiratorii.

Hiperpneea de efort se realizează prin mecanisme neuro-reflexe plecate de la nivelul proprioceptorilor musculari intra- și extrafusali și întregite de stimulii chimici reprezentați de creșterea CO_2 , a acidului lactic și H^+ în sânge și lichidul cefalorahidian.

Adaptarea la hipoxia de efort prin hiperpnee se traduce prin răspunsuri ventilatorii și sanguine mai reduse la cei antrenați decât la neantrenați.

Acoperirea necesităților de oxigenare a țesuturilor se realizează în efort pe trei căi cuplate:

- schimbul alveolo-capilar, asigurat prin difuziunea crescută de 4–6 ori a oxigenului;
- transportul mai rapid al oxigenului din capilarele pulmonare spre țesuturile beneficiare;
- eliberarea intensificată a oxigenului la nivel tisular, ca urmare a favorizării procesului de disociere a oxihemoglobinei de către O_2 tisular scăzut și CO_2 crescut (efectul Bohr).

Prin antrenament fizic gradat și susținut, respirația devine mai eficientă, atât din punct de vedere al schimburilor gazoase, cât și al utilizării oxigenului la nivel tisular.

Debitul respirator adecvat efectuării unui anumit efort crește mai ales pe seama volumului curent, care poate atinge 40–60% din capacitatea vitală, ca urmare a solicitării intense a mușchilor inspiratori (diafragm, intercostali etc.) și a creșterii complianței toracelui și plămânilor.

La îmbunătățirea mecanicii respiratorii se adaugă creșterea saturației în oxigen a sângelui arterial, pe de o parte, și a rezistenței la apnee și hipoxie, pe de altă parte.

Datorită acestor mecanisme, funcția respiratorie nu reprezintă un factor limitant în efort decât în cazuri extreme de depășire a limitelor sale maxime sau în condiții de hipoxie (altitudine, hiperbarism, medii hipoxice, boli cardio-pulmonare etc.). Mai important, din acest punct de vedere, este debitul cardiac, al cărui rol limitativ a fost menționat deja.

Reacții neuro-endocrine. Componenta neuro-endocrină deține locul principal atât în producerea actului comportamental minor, cât și în realizarea reacțiilor vegetative și endocrine. În timp ce postura și mișcările coordonate active sunt sub controlul cortexului motor precentral, al căii piramidale, cerebelului și formațiunilor subcorticeale ale sistemului extrapiramidal, reacțiile de integrare, activare și adaptare metabolică din efortul fizic sunt realizate pe cale neuro-endocrină, cu participare simpatico-adrenală, pe de o parte, și hipotalamo-hipofizo-corticosuprarenală, pe de altă parte.

Sistemul simpatico-adrenal. Ca sistem ergotrop de alarmă și răspuns nespecific la solicitările stresante de diferite cauze, prezintă reacții diferențiate în funcție de tipul și intensitatea efortului, condițiile ambientale și gradul antrenamentului. În general, fenomenele de predominanță simpatică pot fi apreciate în funcție de concentrația sanguină sau de eliminarea urinară a catecolaminelor și/sau a acidului vanilmandelic (AVM), ca principal produs de inactivare a acestora, fiind de 2-6 ori mai intense la subiecții neantrenați. Descărcările simpatico-adrenergice sunt mai reduse la antrenați, iar normalizarea se realizează mai rapid, datorită contrareglării vagale mai eficiente.

La rândul său, eliberarea catecolaminelor apare diferențiată în funcție de tipul și gradul de solicitare fizică sau psihică.

În timp ce efortul fizic de scurtă durată determină eliberare predominantă de adrenalină, eforturile intense se însoțesc de hipersecreția ambelor catecolamine (adrenalină și noradrenalină). Prima asigură starea de alertă (din prestart) și reacțiile catabolice inițiale produse de stresul de efort (metabolizarea și utilizarea glicogenului și grăsimilor de rezervă), iar noradrenalină realizează adaptările hemodinamice generale indispensabile realizării lui în limite normale.

Scăderi ale eliberării și excreției de catecolamine apar în efortul la temperaturi înalte, în mediul hiperbar și oboseală. Relații inverse există între gradul oboselii și conținutul plasmatic sau urinar în catecolamine.

Sistemul hipofizo-corticosuprarenal. Printre factorii activatori ai complexului hipotalamo-hipofizo-corticosuprarenal figurează și efortul fizic sau neuro-psihic.

Sub influența descărcărilor mai mari de ACTH hipofizar, cu participarea stimulatoare a CRF-hipotalamic, se eliberează cantități adecvate de cortizol, ca principal hormon glucocorticoid, în vederea satisfacerii necesităților energetice crescute prin procesul de gluconeogeneză.

La subiecții antrenați, activarea corticotropă este mai eficientă decât la neantrenați.

Concentrația de glucocorticoizi a sângelui crește progresiv, până la un punct, cu intensitatea efortului fizic.

Eforturile intense sau de lungă durată urmate de oboseală duc, din contră, la scăderea atât a corticoidilor sanguini, cât și a metabolizilor steroidici urinari (17-CS, 17-OHCS, 11-OHCS). Scăderea concentrației glucocorticoizilor din sânge se datorește fie reducerii progresive a stocului hormonal glandular, fie utilizării tisulare excesive a acestora, fie, în sfârșit, inhibiției nervos centrale a controlului neuro-endocrin la nivel hipotalamic sau hipocampic.

Activarea hipotalamo-hipofizo-corticosuprarenală din efortul intelectual intens poate, de asemenea, duce la scăderea secreției de corticoidi și a excreției urinare de 17-OHCS, mai ales în cazurile de surmenaj psiho-fizic.

Alte reacții adaptative neuro-endocrine. În afara reacțiilor simpatico-adrenale și hipofizo-suprarenale, efortul determină numeroase alte descărcări neuro-endocrine. Printre acestea figurează creșterea secreției de hormoni tiroidieni, gonadali și, mai ales, de somatotrop hipofizar. Acesta din urmă participă la realizarea hipertrofiei musculare din timpul antrenamentelor, în general, și a celor de tip izotermic în particular. La activarea hipotalamo-hipofizară contribuie și hipoglicemia de efort, presiunea parțială a gazelor sanguine și reducerea pH-ului. În timp ce sistemul simpatico-adrenal participă la asigurarea surselor energetice rapid utilizabile și intervine în activarea nervos centrală a reacțiilor comportamentale și emoționale asociate diverselor tipuri de efort, complexul hipotalamo-hipofizo-corticosuprarenal, împreună cu hormonii tiroidieni și gonadali, asigură substratul energetic necesar eforturilor prelunge și intense, mărind rezistența nespecifică la hipoxic și stres, în general.

La rândul lor, vasopresina și aldosteronul contribuie prin ajustările volumice la menținerea homeostaziei cardio-vasculare și hidroelectrolitice în efort și restituție. Un rol important revine și sistemului renin-angiotensină, ca punte de legătură între veriga simpatico-adrenală imediată și cea suprarenală și gonadală de lungă durată.

21.7.6. CONSTANTE SANGUINE ÎN EFORT

În timpul și după terminarea efortului se produc modificări importante ale principalelor constante sanguine, cu valoare deosebită în diagnosticul de laborator al gradului de solicitare și tipului de efort prestat. Astfel, în efortul dinamic intens se produce scăderea presiunii parțiale (P) a CO_2 , fără modificări semnificative ale oxigenului din sânge, datorită ventilației pulmonare exagerate, indusă de acidoză lactică din sânge și mușchi (fig. 21.13). Saturația în oxigen a sângelui scade proporțional cu creșterea solicitării, iar diferența arterio-venosă crește de la 0,05 (în repaus), la 0,14, la neantrenați, și până la 0,17, la subiecții antrenați.

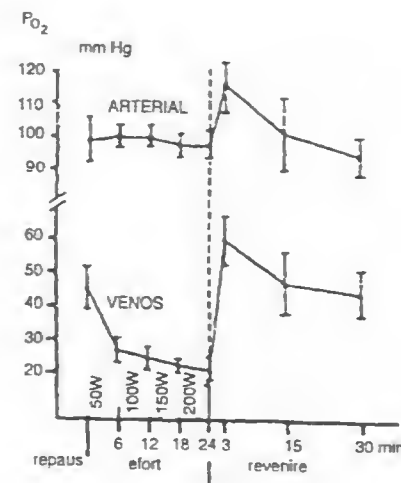


Fig. 21.13. Presiunea parțială a oxigenului din sângele arterial și venos în timpul efortului intens.

La rândul său, creșterea diferenței arterio-venoase se datorește extracției mai intense a oxigenului din sânge de către mușchii în stare de hiperactivitate.

Hematocritul, de asemenea, crește, ca rezultat al permeabilității și filtrării capilare mărite și eliberării de eritrocite de la nivelul organelor hematopoietice.

Numărul de leucocite apare crescut în eforturile de performanță, cu modificarea raportului dintre diferite tipuri de elemente figurate albe, ca urmare a creșterii predominante a neutrofililor.

Echilibrul acido-bazic virează spre acidoză metabolică, datorită producerii în exces și acumulării acidului lactic. În condiții de repaus, concentrația lactatului arterial este de circa 1 mmol/litru. În eforturile submaximale, acidul lactic variază între 10-15 mmol/litru, iar în efortul maximal poate atinge 15-22 mmol/l. La rândul său, pH-ul scade atât în sângele arterial, cât și în cel venos (fig. 21.14).

Gluciza din sângele arterial scade numai în eforturile grele și de lungă durată. Acizii grași liberi și glicerolul sunt în mod adecvat afectați, în sensul creșterii lor în eforturile intense.

Concentrația unor electroliți din sânge și, mai ales, a sodiului și potasiului scade, ca urmare a pierderilor sudorale, concomitent creșterii transaminazelor, datorită modificărilor de permeabilitate a membranelor musculare și trecerii acestora în torrentul sanguin. Eforturile intense efectuate în condiții de căldură și umiditate determină și scăderea greutatei corporale cu 5-10%, ca urmare a pierderilor mari de apă

prin sudație. Fiind însoțite de reducerea performanțelor fizice, pierderile lichidiene și electrolitice trebuie înlocuite prin ingestia de băuturi cu conținut adecvat. Suplimentarea ingestiei de clorură de sodiu trebuie făcută cu prudență, întrucât excesul de sare scade capacitatea de efort. Aclimatizarea reduce pierderile hidrosaline grație secreției crescute de aldosteron și reabsorbției mai intense a clorurii de sodiu, eliminată odată cu apa pe cale sudorală.

În eforturile statice, fluxul sanguin devine inadecvat când forța contractilă depășește 15% din maximum izometric. Principala cauză a fluxului sanguin redus este presiunea intramusculară crescută, superioară presiunii capilare. Datorită acestui fapt, energia de contracție se obține pe cale anaerobă, cu producere crescută de lactat și predispoziție la oboseală musculară.

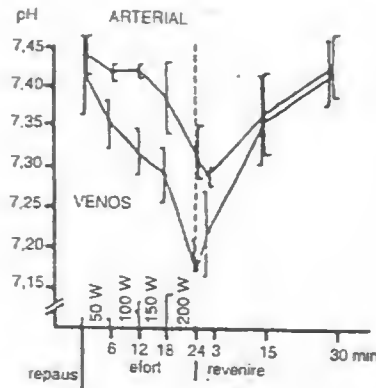


Fig. 21.14. Variațiile pH-ului arterial și venos în timpul efortului fizic intens.

21.7.7. TERMOREGLAREA ÎN TIMPUL EFORTULUI

Cea mai mare parte din energia eliberată în timpul contracției musculare fiind convertită în căldură, efortul muscular se însoțește de creșterea temperaturii corporale. Principalul mijloc de îndepărtare a excesului caloric astfel realizat îl reprezintă sudația.

Secreția sudorală depinde însă nu numai de intensitatea și durata efortului, ci și de condițiile ambientale (temperatura și umiditatea mediului). Ea se datorește producerii crescute sau eliminării insuficiente de căldură ori de câte ori zona de neutralitate termică a fost depășită (22°C pentru organismul uman îmbrăcat și 28°C în condițiile organismului dezbrăcat). Prin evaporare se pierd mari cantități de energie calorică (0,58 cal/ml H₂O), determinând scăderea temperaturii pielii sub nivelul celei rectale. Concomitent cu creșterea secreției sudorale până la 1–2 litri/h, în efortul fizic intens are loc eliminarea unor cantități mari, de până la 2 g/l de acid lactic.

Când procesele termolitice de convecție, conducție, iradiere și, mai ales, de evaporare nu izbutesc să îndepărteze excesul de căldură, pot apărea fenomene de șoc caloric, reprezentate de oboseală, transpirații profuze, amețeală, greață, colaps vascular, pierderea conștienței etc.

21.7.8. LIMITELE ADAPTABILITĂȚII FIZIOLOGICE

Factorul biologic limitativ este cel care condiționează maxima funcționare a unuia dintre cele trei mecanisme bioenergetice fundamentale: alactacid, lactacid și aerob, sau, altfel spus, limitarea este specifică și se adresează numai organelor și sistemelor care condiționează un anumit substrat energetic.

Pentru eforturile anaerobe, alactacide (eforturi de putere), factorul limitativ este reprezentat de sistemul neuro-muscular, iar pentru cele lactacide (submaximale) de capacitatea organismului de a rezista la datoria de oxigen și acumularea de acid lactic. Eforturile aerobe au ca factori limitativi depozitele de glicogen muscular și cantitatea maximă de oxigen consumată în unitatea de timp.

Cunoașterea factorilor limitativi contribuie la alegerea corectă a mijloacelor de stimulare a potențialului biologic uman.

21.7.9. OBOSEALĂ – REFACERE

Oboseala este starea indusă de efortul greu, asociată cu scăderea capacității de performanță fizică (musculară) sau psihică (nervosă centrală).

Mecanismul de producere a fenomenului de oboseală constituie obiectul unor păreri controversate. Ipoteza acumulării uneia sau mai multor substanțe fatigante nu a putut fi confirmată nici în cazul oboselei fizice și nici al celei neuro-psihice.

Refacerea vizează atât reducerea stării de oboseală, cât și restabilirea performanțelor.

Prin refacere înțelegem reechilibrarea biologică a organismului stresat de efort. Se știe că în timpul unei solicitări de o anumită intensitate, durată și frecvență, organismul plătește un preț biologic direct proporțional cu rezervele sale funcționale (este starea de oboseală fiziologică sau „pessimum”). După efort, organismul își plătește datoriile contractate în timpul solicitării, reeditând plafonul biologic inițial (refacere) sau chiar depășindu-l (supracompensare, suprarestabilire sau suprarefacere). Această succesiune efort-oboseală-refacere a fost denumită treptedul biologic al performanței umane și are ca substrat fiziologic legea adaptabilității și reversibilității (curba lui Folbort) (fig. 21.15).

După eforturi obișnuite organismul se reface natural, spontan; în cazul eforturilor epuizante este necesară refacerea dirijată, care se adresează substratului biologic afectat de efort și urmărește reeditarea homeostaziei de repaus și mai ales „supracompensarea funcțională” (utilizăm mijloace psihologice, farmacologice, dietetice, balneare etc.). Conceptul de refacere trebuie deosebit de noțiunea de recuperare care se adresează unui organism traumatizat.

Ea se obține în cazul oboselei fizice prin pauze repetate, de scurtă durată, sau printr-o pauză unică, prelungită. În cazul oboselei nervoase se poate realiza îndepărtarea rapidă a acesteia fie prin înlocuirea activității fatigante cu o altă formă de activitate, fie prin schimbarea mediului sau a stării afective respective.

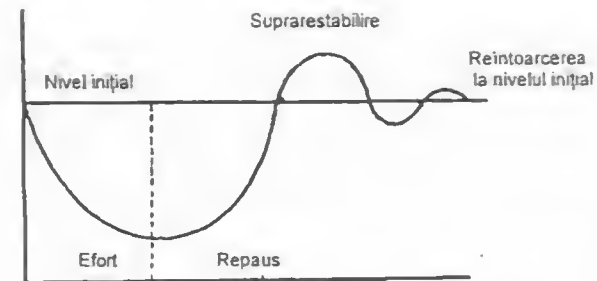


Fig. 21.15. Prezentarea schematică a teoriei suprarefecerii (Curba lui Folbort).

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- ADOLPHI M., GUILLONZO A., MARANO F.: Toxicologie cellulaire générale. In: *Inserm*, Paris, 1955, 15.
- AHLQUIST R. P.: *Am. J. Physiol.* 1948; 153: 586.
- ARSENI C., CHIMION D.: Lichidul cefalo-rahidiao. Edit. Didactică și Pedagogică, București, 1979.
- ARSENI C., POPESCU L.: Semiologie neurologică. Edit. Didactică și Pedagogică, București, 1981.
- AUMULLER G., LEONHARDT M., JANSSEN M., KONRAD L., BJARTELL A., ABRAHAMSSON P. A.: Neurogenic origin of human prostate endocrine cells. *Urology*, 1999; 53(5): 1041-8.
- BACIU I.: Cum funcționează ereierul? Edit. Dacia, Cluj, 1974.
- BACIU I.: Fiziologie: ed. a 2-a. Edit. Didactică și Pedagogică, București, 1977, 143-259.
- BACIU I.: Homeostazia oxigenului. Edit. Dacia, Cluj, 1984.
- BACIU I., DEREVENCO P.: Bazele fiziologice ale ergonomiei. Vol. I și II. Edit. Dacia, Cluj, 1986.
- BADIU G., TEODORESCU-EXARCU L.: Fiziologia și fiziopatologia sistemului nervos. Edit. Medicală, București, 1978.
- BALFOUR SLONIM N. (sub red.): *Environmental Physiology*. C. V. Mosby Company, St. Louis, 1974.
- BARBU R.: Explorări funcționale. Edit. Didactică și Pedagogică, București, 1979.
- BARBU R.: Fiziopatologie. Edit. Didactică și Pedagogică, București, 1980.
- BENGA G., POPESCU O., BORZA V., POP V. I., MUREȘAN A., MOCSY L., BRAIN A., WRIGGLESWORTH J. M.: Water permeability in human erythrocytes: identification of membrane proteins involved in water transport. *Eur. J. Cell. Biol.* 1986; 41(2): 252-62.
- BENETATO Gr.: Elemente de fiziologie normală și patologică. Vol. I și II. Edit. Medicală, București, 1962.
- BERNE R. M., HOFFMAN F. J.: *Ann. Rev. Physiol.; Abb. Rev. Inc.*, Palo Alto, 1964.
- BERNE R. M., LEVY M. N., KOEPPEN B. M., STANTON B. A.: *Physiology*, ed. a 5-a, Mosley, Elsevier Inc., 2004.
- BERNE R. M., RUBIO R.: Coronary Circulation. In: *Handbook of Physiology*, partea a II-a. Bethesda Md, 1979.
- BERNE R. M., LEVY M.: *Physiology - The Digestion*, Mosby Company, St. Louis - Toronto, 1983, 743-817.
- BRACHET P.H.: Les facteurs de croissance a l'honneur. La recherche 1986, 17, 183, 1554-1556.
- BEST and TAYLOR (sub red.): *Physiological Basis of Medical Practice*, ed. a 7-a. Williams Wilkins Company, Baltimore, 1985.
- BOCCI V.: Production and Role of Interferon in Physiological Conditions. *Biol. Rev.* 1981; 56: 49-85.
- BURNSTOCK G.: *Progr. Brain Res.* 1979; 49: 3.
- BURNSTOCK G., HOYLE Ch.: *Anatomie Neuroeffector Mechanisms*. Harwood Acad. Publ. GmbH Switzerland, Philadelphia, Paris, 1992.
- CANNON W. B.: *The Wisdom of the Body*. Norton & Company Inc., New York, 1932.
- COFFEY D.: The molecular biology, endocrinology and physiology of the prostate and seminal vesicles in *Campbell Urology*, ed. a 6-a, 1990.
- CARPENTER R. H. S.: *Neurophysiology*. Edward Arnold Ltd., Londra, 1984.
- CĂLCĂIANU G., STOICA I.: Electroencefalografie și electromiografie. Edit. Medicală, București, 1963.
- CERNEA P.: Fiziologie oculară. Edit. Medicală, București, 1986.
- COCULESCU M., OPRESCU M., ZĂGREAN L.: *Rev. Roum. Physiol.* 1977; 14: 47.
- COCULESCU M.: Neuroendocrinologie clinică. Edit. Științifică și Enciclopedică, București, 1986.
- DANIELOPOLU D.: Le tonus cardiovasculaire et l'épreuve amphotrope carotidienne, Masson et Cie, Paris, 1935.
- DANIELOPOLU D.: Farmacodinamie nespecifică. Vol. I și II. Edit. Academiei R. P. R., București, 1954.
- DAVIES A., BLAKELEY A. G. H., KIDD C.: *Human Physiology*. Churchill-Livingstone, Edinburgh, London, 2001.
- DEVLIN Th. M.: *Textbook of Biochemistry*, ed. a 3-a. Wiley-Liss, New York, 1992.
- DICULESCU I. și colab.: Biologie celulară. Edit. Didactică și Pedagogică, București, 1983.
- DUBOS R.: L'homme et l'adaptation au milieu. Payot, Paris, 1973.
- DZAU V. J., THEODORE COOPER LECTURE: Tissue angiotensin and pathobiology of vascular disease: a unifying hypothesis. *Hypertension* 2001; 37(4): 1047-52.
- ECCLES C. L.: *The Physiology of Synapses*. Springer Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1964.

- ERNST E., STRAUB B. F.: Symposium on muscle. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1968.
- FABRE R., ROUGIER G.: Physiologie Médicale, Maloine, Paris, 1961.
- FENN O., RAHN H.: Handbook of Physiology (Respiration). American Physiological Society, Washington, 1964.
- FEYRTER F.: Über die peripheren endokrinen (parakrinen) Drüsen des Menschen, Mandrich W. (ed.), Viena, 1953.
- FLÜCKIGER E., DEL POZO E., von WERDER K.: Prolactin – physiology, pharmacology and clinical findings. Springer Verlag, Berlin – Göttingen – Heidelberg, 1982.
- FOLKOW B., UVNÄS H.: Acta physiol. Scand. 1954; 47: 125.
- FURCHGOTT F. R.: Circul. Res. 1983, 53 (5): 557.
- GAILLARD F. M.: Le sommeil – ses mécanismes et ses troubles. Payot, Lausanne, 1990.
- GAMBLE J. C.: The Muscular-skeletal system – physiological basis, Raven Press, New York, 1987.
- GANONG W. E.: Review of Medical Physiology, ed. a 11-a. Drawer L. (ed.), Lange Medical Publishers, Los Altos, California, 1983, 377–414.
- GANTEN D., MINNICI J. L., GRAUCHER P. și colab.: Science 1971; 173: 64.
- GANTEN D., PRINTZ N., PHILLIPS M. I. și colab.: The Renin-Angiotensin System in the Brain. Springer Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg-New York, 1982.
- GOODMAN L. S., GILMAN A.: The Pharmacological Basis of Therapeutics, MacMillan Company, New York, 1985.
- GROZA P., HAULICĂ I.: Fiziologie, Edit. Didactică și Pedagogică, București, 1966.
- GROZA P.: Fiziologia umană, ed. a 3-a. Edit. Medicală, București, 1988.
- GROZA P.: Fiziologia tractusului digestiv. Edit. Academiei, București, 1986.
- GUYTON C. A.: Function of the Human Body. W. B. Saunders Company, Philadelphia, 1969.
- GUYTON C. A.: Medical Physiology, ed. a 7-a. W. B. Saunders Company, Philadelphia, 1986.
- GUYTON C. A.: Textbook of Medical Physiology, ed. a 8-a. W. B. Saunders Comp., 1991.
- HARBORNE J. R.: Introduction to Ecological Biochemistry. Academic Press, Inc., New York, 1977.
- HARPER A. H.: Review of Physiological Chemistry. Lange Medical Publishers, Los Altos, California, 1969.
- HARRIS G. W.: Neural Control of the Pituitary Gland. Edward Arnold Publishers, Londra, 1955.
- HAULICĂ I.: Sistemul nervos vegetativ. Edit. Medicală, București, 1975.
- HAULICĂ I. (sub red.): Fiziologia umană, ed. a 2-a. Edit. Medicală, București, 1996.
- HAULICĂ I., BILD W., MIHAILĂ C., ȘERBAN D. N., ȘERBAN L., BOIȘTEANU D., IONIȚĂ T., RĂDĂȘANU O.: Comparative study of the inhibitory effects of adrenomedullin on angiotensin II contraction in rat conductance and resistance arteries. J. Renin Angiotensin Aldosterone Syst. 2004; 5(2): 79–83.
- HAULICĂ I., DOBRESCU GIOCONDA: Transmiterea sinaptică. Edit. Academiei Române, București, 1999.
- HAULICĂ I., PETRESCU GH., BRĂNIȘTEANU D. D.: Sistemul renină-angiotensină. Edit. Junimea, Iași, 1978.
- HAULICĂ I., PETRESCU G., SLĂTINEANU S. M., BILD W., MIHAILĂ C. N., IONIȚĂ T.: New bioactive angiotensins formation pathways and functional involvements. Rom. J. Int. Med. 2004; 42 (1): 22–40.
- HAULICĂ I., CĂRARE N., ROTARU C. și colab.: Elemente de fiziologie. I. M. F. Iași, 1979.
- HAULICĂ I., BRĂNIȘTEANU D. D., PETRESCU GH.: Hormonii locali. Edit. Junimea, Iași, 1983.
- HERMANN H., CIER J. F.: Précis de physiologie, ed. a 3-a. Vol. I–IV, Masson et Cie, Paris, 1975.
- HEYMANS C., BOUCKAERT J. J.: C. R. Séances Soc. Biol. 1932; 110: 202.
- HIEBEL B.: In: Monoamines, Opiates and Brain – Gut Peptides, Eating and its Disorders. Sunkard A. I., Stellar E. (ed.). Raven Press, New York, 1984.
- HOGG R. J., KOKKO J. P.: Rev. Physiol. Biochem. Pharmacol. 1979; 95–131.
- HOUSEKNECHT K. L., BAILE C. A., MATTERI R. L., SPURLOCK M. E.: The biology of leptin: a review. J. Anim. Sci. 1998; 76(5): 1405–20.
- ICHIKAWA I.: Am. J. Physiol. 1982; 447–455.
- KAYSER Ch.: Physiologie. Vol. III, Flammarion (Médecine-Sciences), Paris, 1963.
- KEIDEL W. D.: Kurzgefasstes Lehrbuch der Physiologie, G. Thieme Verlag, Stuttgart-New York, 1985.
- KITAMURA K., KANGAWA K., KAWAMOTO M., ICHIKI Y., NAKAMURA S., MATSUO H., ETO T.: Adrenomedullin: a novel hypotensive peptide isolated from human pheochromocytoma. Biochem. Biophys. Res. Commun. 1993; 192(2): 553–60.
- KREINDLER A.: Structura și funcțiile sistemului nervos central. Edit. Academiei R. S. R., București, 1976.
- KUFFLER S. W., NICHOLIS J. G., MARTIN A. R.: From Neuron to Brain Sinoventr. Ass. Inc. Publ. Sunderland Mass., 1984.
- LAGET P.: Biologie et physiologie des éléments nerveux. Masson et Cie, Paris, 1970.
- LERNER A. B., CASE J. D., HEINZEIMANN R. V.: Am. Chem. Soc. 1959; 81: 6 084.
- LHERMITTE și colab.: Système nerveux et muscles. En: La pathologie médicale. Valléry-Radot (ed.). Flammarion, Paris, 1974.
- LIEBERMAN D. A.: Learning and memory. Thomson-Wadsworth, Australia, 2004.
- LONG S. E., DUFFIN J.: Can. J. Physiol. Pharmacol. 1984, 62, 2, 161–182.

- MAAS J. W., LANDIS D. H.: J. Pharmacol. Exp. Ther. 1971; 177 (3): 600.
- McILWAIN H., BACHELARD S. H.: Biochemistry and Central Nervous System. Churehill-Livingstone, Londra-Edinburgh, 1985.
- McLENNAN II.: Synaptic Transmission. W. B. Saunders Company, Philadelphia, 1970.
- MEYER Ph.: Physiologie humaine. Flammarion (Médecine-Sciences), Paris, 1980.
- MIHAILĂ I.: Bazele științifice și aplicațiile ergonomiei. Edit. Medicală, București, 1982.
- MILCU S. M., PAVEL S., NEACȘU C.: Endocrinology, 1963; 72: 953.
- MINAIRE Y., LAMBERT R.: Physiologie humaine – La digestion. Edit. Villenbanne, 1976.
- MINEU I., MIHALACHE N., CHEȚA D.: Elemente de biochimie și fiziologie a nutriției. Edit. Medicală, București, 1985.
- MONNIER M.: Functions of the Nervous System: Elsevier N. V. Nitgevers Mij., Amsterdam, 1970.
- MOREL F., DOUCET A.: Physiol. Rev. 1986; 66 (2): 377–467.
- MORIN G.: Physiologie du système nerveux central. Masson et Cie, Paris, 1971.
- MOUNTCASTLE V. B.: Medical Physiology C. V. Mosby Company, 1982.
- MUNGIU O. C.: Tratat de algeziologie. Edit. Polirom, Iași, 2002.
- MUREȘAN ADRIANA: Eritropoietina – Implicații fiziologice, fiziopatologice și clinice. Edit. Dacia, Cluj-Napoca, 1997.
- NYLNER W. G.: The Endothelios. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1990.
- NEAMȚU C., NEAMȚU A.: Bazele neurofiziologice ale durerii. Edit. Venus, Iași, 2001.
- NIEUWENHUIS R.: Chemoarchitecture of the brain. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1985.
- PAGES A.: Le système endocrinien diffus. Ann. Anat. Pathol. 1975; 19 (4): 335.
- ONAISSI M. A., CAPRON H.: Fibronectines: structures et fonctions. Ann. Inst. Pasteur Immunol. 1985; 136 C (2): 169–185.
- PASTUCI O.: Condițiile de viață ale omului sub apă. În: Probleme actuale de biologie. Pora E. (ed.). Vol. III. Edit. Didactică și Pedagogică, București, 1983, 196–230.
- PAULESCU N. C.: Arch. Int. Physiol. 1921; 17: 85.
- PĂUN R.: Tratat de medicină internă. Aparatul respirator. Edit. Medicală, București, 1983.
- PĂUȘESCU E., CIURVASIE R., NECHIFOR M.: Prostaglandinele în patologie și terapeutică. Edit. Medicală, București, 1982.
- PEARSE A. C. E.: Nature 1966; 211: 598.
- PETRESCU G., HAULICĂ I.: Sistemul renină-angiotensină – de la experiment la clinică. Edit. Academiei Române, București, 2002.
- PHOMER K.: Acta Physiol. Scand. 1977; 93: 48.
- PITIȘ M.: Endocrinologie. Edit. Didactică și Pedagogică, București, 1985.
- POPA GR. T., FIELDING U.: J. Anat. 1930; 65: 88.
- POPOVICIU L.: Somnul normal și patologic. Edit. Medicală, București, 1972.
- POPOVICIU L., HAULICĂ I.: Patologia sistemului nervos vegetativ. Edit. Medicală, București, 1982.
- PORA A. E.: Homeostazia. Edit. Științifică și Enciclopedică, București, 1981.
- RADU H.: Patologia unității motorii. Edit. Medicală, București, 1978.
- RESTIAN A.: Medicină cibernetică. Edit. Dacia, Cluj-Napoca, 1983.
- ROUSSY G., MOSINGER M.: Rev. Neurol. 1938; 69: 459.
- ROUSHMER F. R.: Structure and Function of the Cardiovascular System. W. B. Saunders Company, Philadelphia, 1976.
- SABĂU M.: Fiziologia inimii. Edit. University Press, Tg. Mureș, 1999.
- SAGER O., MAREȘ A., NEȘTIANU V.: Formația reticulată. Edit. Academiei R. S. R., București, 1965.
- SAULEA A., TACHE S.: Fiziologia jesunilor excitabile. Edit. Risoprint, Cluj-Napoca, 2004.
- SCHARRER E. Z.: Physiol. 1928; 7: 1.
- SHERWOOD L.: Human Physiology – From cells to systems. ed. a 4-a. Brooks/Cole, Australia, Canada, Mexico, 2001.
- SCHIMMEL M., UTIGER R. D.: Ann. Intern. Med. 1977; 87: 760.
- SCHNEIDER E., PETROIU ANA, ȘTEFĂNICĂ P. și colab.: Fiziologie. Vol. IV, I. M. F., 1955.
- SCHNEIDER Fr., PETROIU ANA, NIHALĂȘ GEORGETA și colab.: Fiziologie. Vol. III, I. M. F. 1985.
- SCHMIDT F. R., THEWS G.: Human Physiology. Springer Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1983.
- SCHMIDT-NELSEN B.: Yale J. Biol. Med. 1979; 545–561.
- SELYE H.: Annual Report on Stress. Acta Inc. Medical Publ. 1951.
- SLONIN N. B.: Respiratory Physiology. C. V. Mosby Company, St. Louis, 1979.
- SMITH T. J., EDELMAN J. S.: Fed. Proc. 1979; 38: 2150.
- STAMATOIU I., AȘGIAN B., VASILESCU C.: Electromiografie clinică. Edit. Medicală, București, 1983.
- STRATTON B. D.: Neurophysiology. McGraw-Hill Book Company, New York, 1981.
- STROESCU V.: Bazele farmacologice ale practicii medicale, ed. a 11-a. Edit. Medicală, București, 1999.
- STRUNGARU Gr., POP M., HEFCO V.: Fiziologie animală. Edit. Didactică și Pedagogică, București, 1983.
- STRUNGREN B.: Bazele ecologiei generale. Edit. Științifică și Enciclopedică, București, 1982.

- ȘTEFLEA D. (sub red.): Cronobiologia și medicina. Edit. Medicală, București, 1986.
 TEODORESCU EXARCU I.: Fiziologia și fiziopatologia reproducerii umane. Edit. Medicală, București, 1977.
 TEODORESCU EXARCU I.: Fiziologia și fiziopatologia sistemului nervos. Edit. Medicală, București, 1978.
 TEODORESCU EXARCU I.: Fiziologia și fiziopatologia respirației. Edit. Medicală, București, 1979.
 TEODORESCU EXARCU I.: Fiziologie și fiziopatologie hemodinamică. Edit. Medicală, București, 1985.
 ȚURCANU L., MITROFAN LUCIA: Neonatologie. Edit. Medicală, București, 1985.
 VANDER J. A., SHERMAN II. J., LUCIANO S. D.: Human Physiology. McGraw-Hill Book Company, New York, 1970.
 VASILESCU V., MĂRGINEANU D. G.: Introducere în neurobiofizică. Edit. Științifică și Enciclopedică, București, 1979.
 VIDYASAGAR D., SARNAI K.: Neonatal and Pediatric Intensive Therapy. PSG Publishing Company Inc., Littleton, 1985.
 VINCENT J. D., SIMONNET G.: J. Physiol. (Paris) 1986; 8: 51.
 WALSH J. V.: Io: Gastrointestinal Hormones and Peptides, Johnson L. T. (ed.). Raven Press, New York, 1981.
 WRIGHT S.: Physiologie appliquée à la médecine. Flammarion (Médecine-Sciences), Paris, 1973.
 WURTMAN R. J., AXELROD J.: J. Biol. Chem. 1966; 241: 2301.
 YALOW R. S.: Principles of Competitive Protein-Binding Assays. Lippincott Co., Philadelphia, 1971.
 ZANOSCHII CRISTACHE: Anatomie funcțională ginecologică. Edit. Scripta Manet, Iași, 2004.
 ZĂGREAN L.: Neuroștiințe - Principii fundamentale. Edit. Universității „Carol Davila”, București, 2002.

INDEX ALFABETIC

A

- Abducție 807
 Absorbție 530-541, 744
 - percutanată 629
 Acapnee 336
 Accelerație 1005
 Accelerină 231
 Acceptorii 105
 Acetil coenzimă A 136, 267, 268, 434, 536, 545, 551, 552, 555, 648, 649
 Acetilcolină 134-137, 161, 339, 363, 373, 381, 383, 392, 444, 445, 472, 481, 487, 489, 490, 491, 493, 495, 502, 685, 792, 866, 904, 953
 Acetilcolinesterază 153, 792
 Achilie 496
 Acid arahidonic 213, 219, 230, 724
 - aspartic 533
 - carbonic 190
 - chenodezoxicolic 509
 - citric 549
 - clorhidric 205, 219, 485, 486, 495
 - colic 509, 525
 - condroitinsulfuric 59
 - delta-aminolevulinic (ALA) 201
 - dezoxicolic 509, 525
 - dezoxiribonucleic (ADN) 54, 233, 673
 - ellagic 232
 - folic 205, 458, 460
 - folinic 205
 - gamma-aminoobutiric (GABA) 134, 135, 143, 146, 939
 - glucuronic 510
 - glutamic 142, 533, 559
 - hialuronic 56
 - lactic 56, 267, 339, 364, 373, 384, 470, 550, 798, 1018
 - litocolic 509, 525
 - mucotinsulfuric 56
 - oxaloacetic 549
 - pantotenic 458, 460
 - paraaminohipuric (PAH) 577
 - piruvic 57, 268, 434, 548, 550, 551, 559
 - prostanic 596
 - ribonucleic (ARN) 54, 62, 102, 673
 - stearic 536
 - uric 470, 608
 - vanilmandelic (AVM) 608, 661
 Acidoză 190, 193, 392, 426-428, 589, 592
 Acin 386, 388
 Acizi biliari 219, 511, 525
 - grași 62, 219, 434, 455, 509, 534, 535, 552, 555, 798
 - - liberi 229, 232, 267, 553, 623
 - - deesterificați 949
 Acimatare 998
 Aclorhidrie 496
 Acomodare 123, 124
 - oculară 865, 868
 Acomodație 868, 869
 Acromatopsie 863
 Acromegalie 637, 781
 Acrozom 671
 Act motor voluntar 804, 894
 - reflex 617, 911
 Actină 164, 165, 228, 245, 265
 Actinomicină D 986
 Activitate bacteriană intestinală 524
 - optică 56
 Acto-miozină 164
 Acțiune dinamic specifică a alimentelor (ADS) 454, 462
 Acuitate vizuală 861
 Acumulare focală 212
 Adaptare 979-984, 987, 998, 999
 - gustativă 874
 - olfactivă 880
 Adducție 807
 Adenilat ciclază 111, 139, 162, 339, 547, 604, 606, 632, 651, 696
 Adenină 54
 Adenohipofiză 634
 Adenom hipofizar eozinofil 781
 Adenozină 339, 364, 380, 384, 444, 904
 Adipsie 950
 ADP 230, 268, 434, 435, 544, 545
 Adrenalină 156, 157, 338-339, 363, 381, 383, 513, 547, 557, 563, 606, 660, 661, 680, 687, 994
 Adventice vasculară 312, 313
 Aer digestiv 527
 Aerohipoxie 1001
 Afagie 944
 Afazie 974, 975, 976
 Afectivitate 976, 977
 Ageuzie 873
 Aglutinarea hematiilor 207
 Aglutinine 207, 208
 Aglutinogen 207
 Agoniști 105
 Agrafie 883, 897
 Agranulocite 209
 Albumne 55, 196, 558

Albuminurie 602
 Alcaloză 191, 192, 193, 426, 428, 589, 592, 997, 998
 Aldehidă glicerică 59
 Aldosteron 178, 179, 341, 471, 540, 576, 580, 594, 601, 604, 625, 627, 654, 655, 658, 659, 667
 Alergie 227
 Algoreceptori 954
 Alimentație 453, 464–466
 Altitudine 995–999
 Aluminiu 54
 Alveole 385, 388, 389, 404
 Amfiartroză 784
 Amidon 470, 530
 Amigdală 946, 947
 Amilază pancreatică 505, 531
 – salivară (ptialină) 470
 Amilopectină 531
 Aminoacizi 55, 457, 533, 551, 557, 558, 686, 949
 Amnopolipidă 91
 Amnezie 966, 967
 Amoniac 559, 591, 592
 AMP ciclic 111, 112, 170, 309, 339, 445, 493, 547, 595, 604, 606, 621, 633, 643, 645, 651, 678, 679, 684, 694, 697, 703, 969
 Ampulă Vater 503, 516
 Anaciditate 496
 Anagen 622
 Analizator acustic 842–843
 – gustativ 869
 – olfactiv 867
 – vestibular 838, 842
 – vizual 851, 864
 Anarhie 883, 897
 Androstendion 654, 659, 672
 Anelectrotonus 120
 Anemie 194, 425, 429
 Aneurism 371
 Angiotensină 53, 309, 340, 341, 365, 373, 381, 392, 449, 594, 595, 695, 697, 705–710, 951
 Angiotensinogen 341, 594
 Anhidrază carbonică 431, 591
 Anizocitoză 194, 196
 Anorexie 945
 Anosmie 880
 Anoxie 1003
 Ansă Henle 565, 573
 Anserină 55, 533
 Antagoniști 105
 Anticorpi 207, 220, 222, 226, 447, 748
 – antiidiotipici 226
 – anti-Rh (aglutinine) 208
 Antifactori plasmatici 235
 Antigene 207, 216, 217, 220, 221, 222, 223, 224, 226, 227
 Antigenitate 220, 221
 Antiproteaze 214
 Antipsihică 447, 505
 Antitrombine plasmatice 228, 235
 Anurie 602, 608, 618
 Aortă 390
 Aortografie 614
 Aparat Golgi 65
 – juxtaglomerular 565, 593
 – subneural Couteaux 792
 Apă 52, 59–60, 175–178, 538
 – extracelulară 176–177
 – intracelulară 175
 Apexogramă 273
 Apnee 440, 441, 442, 1009
 Apneuză 439
 Apofritină 202, 539
 Apomorfina 499
 Apoptoză 768
 Apraxie 896, 897
 Aquaporine 71
 Arc reflex 500, 912
 Arginină 457, 533, 559, 641, 684
 Arginin-vasotocină 695, 697
 – Arhiceebel 887
 Ana motricității automate 883
 – – voluntare 882
 Arie Broca 974, 975, 976
 – olfactivă 877
 – psiho-motorie 883
 – somato-senzitivă 830, 831
 – Wernicke 974, 975, 976
 Arit de coordonare cortico-cerebeloase 881, 883
 Arimic 304
 ARN-polimerază 109, 673
 Artere 312
 – coronare 378
 – pulmonare 390, 391
 – renale 566
 Arteriografie 614
 Arteriole 315
 – pulmonare 391
 Articulație 785, 788, 806
 – temporo-mandibulară 474
 Aspirație toracică 369
 Aspirină 230
 Astm bronșic 445
 Ataxie cerebeloasă 887, 888
 – kinetică 897
 Atetoză 884
 Atmosferă 999–1002
 ATP 67, 68, 111, 156, 157, 235, 249, 250–253, 266, 268, 339, 434–436, 444, 502, 544, 546, 548, 550, 560, 798, 904, 1017
 ATPază 85–87, 259, 435, 532, 579, 798
 – Ca²⁺-dependență 164
 Atrofie 799
 Atropină 444, 506, 518, 868
 Audiometrie 847
 Autacoizi 601, 725
 Autofagie 67
 Autofosforilare 113
 Automatism 123, 260–262
 Autoreglarea circulației capilare 345, 365
 – presiunii arteriale 345
 Axă de mișcare 807
 – electrică a inimii 300–301
 Axolemă 70, 817
 Axon 816
 Azot 39, 41

B

Balism 884
 Balistocardiografie 286, 287
 Bandă H 270
 Bantină 495
 Barieră hemato-encefalică 978
 Baroreceptori 820
 Barotrauma 1003, 1010
 Bascuță 807
 Bazinet 614
 Beta-endorfină 637
 – lipotropină 720
 – oxidare 268, 448, 556
 Bicarbonați 190, 430, 431
 Bilanț azotat 456, 457
 Bilă 507, 511–513
 Bilirubină 510, 511
 Bilirubinemie 511
 Biliverdină 206, 510
 Biomembrane 70
 Biont 985
 Biontimitate 984
 Bioxid de carbon 339, 364, 373, 382–384, 385, 415, 416, 419, 423, 426–430, 550
 Bloc ario-ventricular 304
 – de ramură dreaptă 303
 – – stângă 304
 Boală Addison 643
 – Parkinson 884
 – Pompe 67
 Bombazină 491, 492, 494, 717, 718, 948
 Bradicardie 382, 755
 Bradikinină 340, 364, 392, 445, 449, 602, 710, 712, 953, 959
 Bradipnee 408
 Breaking point 442
 Bronhii 387, 388
 Bronhiolă 387, 388, 404
 Bronhoconstricție 444, 445
 Bronhodilatație 444, 445, 446, 448
 Bronhomotricitate 444, 445, 446, 448
 Buclă Papez 335, 977
 Bulb rahidian 828
 Bulbogastronă 719
 Bursă Fabricius 217
 Buion olfactiv 867
 – terminal 128, 792
 Cafeină 603
 Calcemie 694
 Calcitonină (CT) 492, 606, 688, 692, 693, 694, 781
 Calciu 39, 42, 43, 44, 80, 81, 82, 87, 91, 92, 95, 109, 110, 111, 113, 114, 124, 136, 137, 147, 151, 152, 154, 155, 156, 158, 161, 162, 214, 230, 231, 233, 234, 235, 238, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 268, 270, 461, 490, 492, 493, 539, 604, 688, 689, 690, 746
 Calcicurie 691
 Calculi biliari 511
 Calc acustică 846, 849
 – extrapiramidală 890, 891
 – fosfogluconat 551
 – gustativă 871
 – olfactivă 876
 – optică 854, 855
 – piramidală 889–890
 – vestibulară 839–840
 Calice 614
 Calmodulină 111, 604
 Calorimetrie 560, 561
 Calviție 622
 Canal anal (anus) 469, 522
 – colector 576
 – Havers 783
 – Santorini 503
 – Sienon 470
 – Volkmann 783
 – Wharton 470
 – Wirsung 503
 Canale alveolare 388
 – ionice 80, 81, 257
 Canale ionice de Ca²⁺ 81
 – – Cl⁻ 258
 – – K⁺ 81
 – – Na⁺ 81, 257, 258
 – – Na⁺-Ca²⁺ 82, 257
 – semicirculare 841
 Capacitate de difuziune a CO₂ 416
 – – O₂ 415
 – – pulmonară (DP) 412
 – – hidratare 53
 – – oxigenare 424
 – transfer al eritrocitelor (DE) 413
 – – membranei (DM) 413
 – – transport circulator 413
 – – inspirație (CI) 409
 – – pulmonară totală (CPT) 403, 410
 – reziduală funcțională (CRP) 400, 402, 403
 – vitală (CV) 409, 410
 Capilare 313, 319, 352–365
 – pulmonare 391
 Capilaroconstricție 362, 363, 364, 365
 Capilarodilatație 362, 363, 364, 365
 Capsulă articulară 787
 – Bowmann 564
 Caracter amfoter 53
 Carbamați 428, 432
 Carbohemoglobină 195
 Carbon 39
 Carboxihemoglobină 195, 205, 429
 Carboxipeptidază 505, 532
 Carnozină 53, 533
 Cartilaj articular 785
 Castrare 672
 Cășetizare 949
 Cataboliți acizi 339, 364, 373
 Catagen 622
 Cataractă 855
 Catecolamine 134, 137, 138, 139, 309, 339, 373, 380, 392, 445, 449, 491, 625, 660, 661, 663, 664, 685, 754, 940, 969
 Catecoloximetiltransferază (COMT) 140, 661
 Catepsină 486
 Catetensm cardiac 273

Cauzălgie 962
 Cazeină 486, 720
 Cazeinogen 486, 533
 Căi aferente 913
 - eferente 913, 914
 - oculo-cefalogire 893
 - oculomotorii 891
 Căile motricității iotrinseci 893
 - - vegetative 893
 Căldură de activitate 127
 Cec 469, 599
 Cecitate 858
 - verbală 897, 976
 Cefalgie 962
 Cefaline 58, 555
 Celulă 61
 - primordiale 197
 Celule acidofile 636
 - acinoase 503
 - adipoase 70
 - amacrine 854
 - argirofile 484
 - bazofile 636
 - bipolare 854
 - calciforme 388, 516
 - cilindrice ciliate 388
 - Claz 387, 388
 - cromofile 636
 - cromofobe 636
 - cu bastonașe 854, 865
 - - conuri 853, 865
 - - marginea „în perie” 388, 516, 522, 565
 - - mucus 484
 - - „văl” 627, 628
 - dendritice 628
 - „EG” 516
 - enterocromafine 484, 516
 - foliculare 674
 - „G” 484, 491, 516
 - ganglionare (multipolare) 854
 - Langerhaos 627
 - Leydig 647, 672, 673
 - mezangiale 570
 - NK 220
 - oxintice 484, 485
 - Paneth 516
 - parafoliculare 693
 - prezentatoare de antígeno (APC) 223
 - „S” 516
 - Schultze 876
 - Schwann 817
 - senzoriale 839, 870, 876
 - Sertoli 671
 - zimogene 484
 Celuloză 531
 Centri cardiomotorii 333, 334
 - motori extrapiramidali 890
 - reflecși 913
 - respiratori 438, 440, 901
 - termoreglatori 336, 899
 - vasomotorii bulbari 333, 334, 337, 344, 901
 - - medulari 336
 - vegetativi 908
 Centriol 69, 900
 Centru apneustic 439
 Centrul de greutate al corpului 800, 801
 Centrul deglutiției 482
 - foamei 899, 944, 946
 - oculomotor (frontal, occipital) 883
 - pneumotaxic 438, 439
 - sățietăți 944, 945
 - seiei 178, 899, 950
 - vezico-spinal Budge 617
 - vomei 499
 - vorbirii 896
 Cerebel 886-888
 Cerebrozide 56
 Ceride 56
 Ceruloplasmină 214
 Cetoacizi 557
 Cetogeneză 559
 17-Cetosteroidi 608, 654, 655
 Chalone 949
 Cheag 234, 238
 Cheltuială energetică 1016
 Chemoreceptori 440-441, 819, 820
 Chemotaxie 219
 Chiasmă optică 855
 Chilomicroni 448, 506, 536, 552
 Chim 495, 496, 497, 498, 507, 539
 Chimiodenin 719
 Chimiotactism 212
 Chimotripsină 504, 532, 533
 Chimotripsinogen 504
 Cianolab 863
 Cianopsină 859
 Cibernine 637, 638
 Ciclooxygenază 230, 341, 365, 725
 Ciclu endometrial 667
 - Krebs 57, 268, 434, 549-550, 551, 1018
 - ovarian 667
 Cili 70, 447
 - olfactivi 878
 - senzoriali 839
 Cilindrax 817
 Circulația muscularii scheletice 383-384
 Circulație arterială 315
 - capilară 354-355
 - cerebrală 382-383
 - coronariană 378-380
 - fetală 740-741
 - feto-placentară 752-753
 - limfatică 374-375
 - - pulmonară 393
 - pulmonară 389-391
 - renală 566
 - venoasă 365-370
 Circumducție 807
 Cisternă perinucleară 62, 64
 Cistoscopie 614
 Citocrom oxidază 434, 435, 550
 Citocromi 434, 550
 Citokine 628
 Citoschelet 69, 74
 Citozină 54

Citrulină 559
 Clearance 572, 598, 612
 Clearance-ul PAH 611
 - fosfaților 611, 612
 - glucozei 611
 - inulinei 572, 611
 - orei 612
 Clinostatism 799
 Clonus 837
 Clor 39, 45, 431, 538
 Clorolab 863
 Clorură de sodiu (NaCl) 588, 608
 Coagulare 230-237
 - intravasculară diseminată (CID) 235, 238
 Cobalt 39, 47, 204, 461
 Codifuziune (difuziune cuplată) 75, 85
 Codon 54
 Coeficient de absorbție 414
 - - difuziune 414
 - - elasticitate 402
 - - extracție a O₂ 419
 - - solubilitate 414
 - - utilizare digestivă (CUD) 464
 - - ventilație 410
 - - respirator 436
 Coenzimă A 535, 548, 551, 672
 Coblee (melc) 843
 Colagen 229, 230
 Colagenază 505
 Colagog 512
 Colecistografie 514-515
 Colecistokion-pancreozimolă (CCK-PZ) 481, 492, 493, 494, 502, 508, 510, 513, 514, 518, 522, 524, 686, 713, 714, 948
 Coleretic 513
 Colereză 509
 Colesterol 71, 511, 534, 536, 537, 554-555, 623, 654
 Colesterol esterază (colesterolază) 505, 534, 537
 Colin acetiltransferază (CAT) 136
 Colică 135, 456
 Coloană Clarke 835
 Colon 469, 522
 Colostru 757
 Complex major de histocompatibilitate (MHC) 223-226
 Complexe imune 226
 Complanță (capacitatea) 317, 322, 328
 - pulmonară 402
 Comportament alimentar 944, 946, 949
 - sexual 729-733
 Concentrarea urinei 586, 587
 Concentrație medie eritocitară (CIEM) 195
 Condiționare instrumentală 972-973
 Condrioblaste 780
 Condriocite 980
 Condrogeneză 639
 Condritină 390
 Conductanță 122, 317
 Conductibilitate 124-126, 263
 Conducție 990
 Conectine 968
 Conexină 90
 Conștiență 943-944, 963
 Contractilitate 154, 264, 315, 367, 1015
 Contractură 155
 Conracție 154-157, 792
 - izometrică 373, 751, 794, 805
 - izotonică 373, 751, 795, 805
 - io alungire 795
 - tetanică 794
 Conracții peristaltice 498, 521, 524
 - tonice 498
 Contratransport 75, 98
 Convecție 417, 990
 Convergență 915
 Copilărie 759, 764
 Coproporfirină 201
 Coproporfirinogen 201
 Corce 884
 Corion 388, 876
 Corneă 851
 Coronarocosticție 381
 Coronarodilatație 380, 381
 Corpi cetonică 58, 556, 559
 Corpus albicans 665
 - luteum 646, 648, 665, 669
 Corpuscul Golgi 790, 833, 834
 - Heinz 207
 - Krause 820, 825
 - Meissner 820, 825, 826
 - Nissl 815
 - Pacini 820, 825, 826, 833
 - Roffini 820, 825, 833
 Cortex auditiv 846
 - cerebral 926
 - motor 442, 882
 - somato-senzorial 830
 - vizual 857
 Corticoliberioid (CRF) 637, 644, 657
 Corticosteroidi 622
 Corticosteron 228, 655
 Corticosuprarenală 653
 Cortizol 551, 641-643, 655-658, 687
 Cortizon 655, 781
 Corzi vocale 450
 Cotransmițători 134
 Cotransport 75, 100
 Creatin fosfokinază 798
 Creatinină 470, 608, 610
 Crește mitocondriale 68
 Crinofagie 67
 Cristalin 851, 852, 861
 Cristaloide 852
 Crom 47
 Cromatină nucleară 62
 Cromogranină 660
 Cromoproteine 53
 Cromozom 62
 Cronaxie 120
 Crosa aortei 820
 Cupru 47, 204, 461
 Copulă 839
 Curbă de disociere a CO₂ 432
 - - - - hemoglobinei 425, 426, 428
 - - - - oxihemoglobinei 427
 Cutie toracică 394

D

Daltonism 963
 Debit arterial de O_2 425
 - cardiac 283, 284, 287, 288, 316, 320, 322-324, 425
 - cerebral 382-383
 - coronarian 378-382
 - de scurgere 320
 - respirator (DR) 410
 - sistolic 283, 284
 - venos de O_2 425
 - ventilator maxim (DVM) 410
 Decelerație 1005
 Decompresie 1013-1014
 - hipobarică 1002
 Defecație 525-526
 Degenerescență 818
 Deglutiție 477-478, 744, 885
 Dehidroepiandrosteron 654, 659
 5'-Deiodinază 676
 Dendrite 816
 Deperdiție calorică 1012
 Depolarizare 122, 151, 153, 258, 259, 261
 Derivați bipolare 291-292, 298
 - precordiale 296, 299
 - unipolare 291, 293, 294, 299
 Derm 618, 629
 Dermatome 954
 Dermatoză 736
 Descărcare repetitivă 123, 124
 Deshidratare celulară 950
 - extracelulară 950
 Desmozom 619
 Detrusor 614
 Dexametazon 644, 655
 Deoxicorticosteron (DOC) 604, 654, 655
 Diabet 556, 681
 Diacilglicerol (DAG) 112, 139, 140, 604
 Diafragm 395, 396
 Diapederă 214, 219
 Diartroze 784
 Diastaze 516
 Diastazis 278, 281
 Diastolă 277, 278
 - ventriculară 274
 Dicromatism 862
 Diencefal 940
 Diferență arterio-venoasă (DAV) 425
 2,3-Difosfoglicerat (2,3-DPG) 426, 427, 428, 429
 Difuziune 76, 410, 412, 414, 416, 418, 419
 - facilitată 76, 79
 - simplă 76
 Digestia bucală 467, 469
 - gastrică 467, 484
 - glucidelor 530-532
 - intestinală 467, 503, 517
 - lipidelor 534-536
 - proteinelor 532-533
 Digestie 466
 Digliceride 535

Dihidrol 59, 672
 Dihidrostestosteron 56
 Dihidroxiacetona 56
 1,25-Dihidroxicolecalciferol 539, 692, 693
 Dihidroxiifenilalanină (DOPA) 621, 649, 660
 Diizopropilfluorofosfat (DFP) 153
 Dilatație cardiacă 282
 Diluția urinei 585
 Dimeri 73
 Dincină 70
 Dinți 474
 Diplopie 861
 Dipol electric 59
 - - cardiac 290, 291
 Disartrie 897
 Disbarism 1004, 1011
 Disc Merkel 820, 825
 Discriminare spațială 830, 863
 Discromatopsie 859
 Discuri anizotrope (A) 245
 - intercalare 245
 - izotrope (I) 245
 Disgeuzie 873
 Dispoziție contractilă 70
 Distres 982
 Distensibilitate 366-367
 Disurie 618
 Diureză 342, 600-602, 607, 608
 - osmotică 581
 - reflexă 333
 Divergență 915
 DOPA 137, 140, 621, 649, 660
 Dopa decarboxilază 449, 660
 Dopachinonă 621
 Dopamin beta-hidroxiilază 660, 661
 Dopamină 134, 140, 381, 649, 660, 947
 Duocrinină 518
 Duoden 468, 503, 514
 Durere 755-756, 951, 952-962

E

Ebluizare 860
 Echilibru acido-bazic 189, 190-192, 589, 592-593, 755
 - Donnan 98
 - glomerulo-tubular 599-600
 - hidric 178-180
 - hidroelectrolitic 184
 - Starling 184, 189, 397
 - termic 989
 Echinococoză 196
 Echocardiografie 286
 Echografie 274, 287
 Ecuație Henderson-Hasselbach 190
 Edem 371, 378
 - cerebral 383
 - pulmonar 330, 417, 418-419
 - renal 610
 Efect Bohr 426, 427, 428, 432
 - Bossi-Bernardi 427, 428
 - Haldane 430, 432
 Efort (izometric, izotonic) 1015, 1016

INDEX ALFABETIC

Elastanță pulmonară 402
 Elastază 505
 Elasticitate 314, 366
 Elastină 53
 Electrocardiografie 290
 - endocavitară 304, 305
 Electrocardiogramă (ECG) 274, 289, 290
 Electroencefalogramă (EEG) 928-930
 Electrogustometrie 875
 Electromiogramă (EMG) 158
 Electronervogramă 126
 Electrotonus 120
 Endocard 248
 Endocitoză 88, 102
 - absorbtivă 67
 Endolimfă 845
 Endometro 734
 Endomisium 789
 Endoperoxizi 313, 724
 Endorfine 720, 721, 959, 960, 969
 Endost 783
 Endoteliu vascular 312, 313, 314
 Enkefalină 721
 Enkefaline 445, 502, 719, 959, 960, 969
 Enofthalmie 867
 Enterocite 516
 Enterocrinină 518
 Enterogastronă 494, 522
 Enteroglucagon 494, 715, 716
 Enterokinaze 504, 516, 517
 Enterotoxigenă 719
 Enurezis 618
 Enzimă de conversie (dipeptidil-carboxipeptidază) 341, 449, 594, 711
 Enzime glicolitice 505
 - lipolitice 505
 - lizozomale 213
 - proteolitice 504-505
 Epiderm 618
 Epilepsie 929, 930
 Epimisium 789
 Epistaxis 237
 Epitopi 221, 224, 225, 226
 Eprepsină 533
 Ergonomie 800
 Entrocateretă 206
 Eritrocit 194
 Eritrogenină 596
 Eritrolab 863
 Eritron 197
 Eritropoietină 199, 200, 341, 595, 596
 Eritropoieză 197, 198, 595, 596
 Eritropsină (purpur retinarian) 859
 Esofag 468, 477, 478-481
 Estradiol 654, 655, 671, 674
 Estriol 665
 Estronă 665
 Eucariote 61
 Eumelanină 621
 Eustres 982
 Evaporare 178, 991

Excitabilitate 115, 116, 151, 153, 257
 - neuronală 116
 Excitant 115
 Excreție tubulară 574
 Exocitoză 66, 88, 102
 Expirație 399, 407
 Expulzie 752
 Extensibilitate 366, 367
 Exiensie 807
 Exteroceptori 819, 825
 Extrasistolă 260
 Ezerină 153, 506, 518, 868

F

Facilitare 915
 Factor antianemic (extrinsec, intrinsec) 205, 485-486
 - antifemofilic (A, B, C) 231, 232
 - de activare a macrofagelor (MAF) 216
 - - agregare plachetară (PAF) 445, 446
 - - creștere nervoasă (NGF) 818, 819
 - - inhibare a migrației macrofagelor (MIF) 216
 - - necroză celulară (TNF) 219, 234
 - endotelial de relaxare (EDRF) (monoxid de azot) 348, 349-351, 381
 - hipogen 940
 - inhibitor al prolactinei (PIF) 637, 649, 757
 - natriuretic atrial (ANF, ANP) 179, 255, 256, 342, 605-606, 707, 723-724
 Factori abiotici 980
 - anticoagulanți 230, 235
 - biotici 980
 - de creștere 104
 - plachetari ai coagulării 228, 229, 232-233
 - plasmatici ai coagulării 230-232
 - procoagulanți 228, 230
 Fagocite 219, 220
 Fagocitoză 67, 88, 102, 212-213, 219
 Fago-lizozom 213, 219
 Fagoxom 213, 219
 Faringe 468, 477, 478
 Fascia adherens 245
 Fascicul Burdach 835
 - cortico-medular 889
 - - nuclear 889
 - Goll 835
 - His 247, 248
 - spino-cerebelos direct (Flechsig) 835
 - - - încrucișat (Gowers) 835
 Fatigabilitate 914
 Fază izometrică 276-277
 - izotonică 277
 Feed-back 172-173, 634
 Fenilalanină 138, 457
 Fenomen Arthus 213
 - Bernoulli 451
 - de adaptare 821-822, 824, 856
 - - contrast 861
 - - fuziune 860
 - - „încălire” 860
 - - reverberație 913
 - - „scăpare” (escape) 309, 339, 907

- Hamburger 191, 192, 431
 - în „scară” (Bowditch) 260
 - Orbelli 796
 - Parkinje 863
 - stimulator de colonii (CSF) 198
 Feritină 202, 203, 539
 Fibre alimentare 462, 524
 - de colagen 312
 - elastice 312
 - musculare netede 160, 312, 313
 - scheletice 149
 - nervoase amielinice 124, 125, 816, 817
 - mielinizate 125, 816, 817
 Fibrilație (atrială, ventriculară) 154, 304
 Fibrină 230, 231, 232, 234, 235
 Fibrinogen 196, 228, 230, 231, 234
 Fibrinoliză 230, 237
 Fibroblaști 230, 780
 Fibronectină 72, 73, 220
 Ficat 508, 543, 544, 745
 Fier 39, 51, 200, 202-204, 424, 426, 461, 539, 747
 Filaggrină 619
 Filamente 69
 Filtrare glomerulară 567, 570-573
 - transcapilară 418
 Fiziologie aerospațială 999
 - ambientală 979
 Flageli 70
 Flavoproteine (FAD, FMN) 434, 485, 550
 Flebografie 614
 Flebogramă 274, 371-373
 Flebomanometru 371
 Flexie 807
 Floră intestinală 524-525
 Fluor 39, 48, 461
 Fluorocortizon 658
 Flotter arterial 304
 Folicul 646, 664-665, 667-670
 Fonație 450-452
 Fonocardiogramă 274-278
 Fonogramă 452
 Forbol esterii 113
 Formă combinată a CO₂ 430
 - - - O₂ 423
 - dizolvată a CO₂ 430
 - solubilă a O₂ 420
 Formațiune reiculată 885, 908, 910, 938, 939, 940, 943, 957, 963
 Formulă Arnet 309
 Forță de difuziune 116-117
 - electrostatică 117
 - gravitațională 369, 794
 - musculară 795-796
 Fosfatază alcalină 219, 517
 Fosfatide 58
 Fosfatidilinozitol 112
 Fosfaturie 691
 Fosfocreatină 157, 546, 798, 1017
 Fosfodiesterază 111, 112, 445
 Fosfoinozitol 506
 Fosfolipază A (PLA) 111, 113, 139, 725

- C (PLC) 112, 139, 604
 Fosfolipide 71, 405, 511, 536, 555
 Fosfomioinozitol 230
 Fosfoproteine 53
 Fosfor 46, 461, 680, 746
 Fosforilare oxidativă 67, 157, 267, 434, 435, 448, 550
 Fotoni 859, 860
 Fotoreceptori 853
 Fotorecepție 858
 Fovea centralis 853
 Fragment constant (Fc) 223, 226
 - de legare a antigenului (Fab) 223, 226-
 Frison termic 993
 Fructoză 56, 516, 531, 532, 546
 Funcție batmotropă (excitabilitate) 257, 308
 - croootropă (ritmicitate) 262, 308
 - dromotropă (conductibilitate) 263, 308
 - inotropă (contractilitate) 264, 308
 - tonotropă (tonicitate) 308
 Fus ocular-muscular 159, 833, 836

G

Galactoză 56, 516, 531, 532, 546, 547
 Ganglion Andersch 871
 - ciliar 866
 - Corti 845, 846
 - Ehlreuther 871
 - Gasser 476, 866
 - Scarpa 839
 Ganglioplegie 492
 Gastrină 481, 488, 489, 491, 492, 493, 494, 502, 507, 513, 514, 522, 524, 681, 686, 693
 Gastroferitină 203
 Gaze inerte 416
 Gândire 973-974
 GDP 109-110
 Gelatinază 485, 486
 Gelatină 487
 Gene 108, 109, 169, 223, 226
 Genom 62
 gestație 738, 739
 Gigantism 639, 781
 Glandă epifiză 694-695
 - hipofiză 634-636
 - tiroidă 211, 674
 Glande Bowman 876
 - bronșice 387, 388
 - Brünner 516, 517
 - endocrine 631
 - gastrice 484
 - Lieberkühn 516, 517
 - mamare 648, 652, 756, 757
 - parietale 472
 - parotide 470, 472
 - sebacee 623
 - sublinguale 470, 472
 - submaxilare 470, 472
 - sudoripare 624-626
 - suprarenale 653
 Glicemie 57, 578, 687
 Glicerină 535
 Glicerokinază 535
 Glicerol 534, 535, 551, 552, 556
 Glicerolfosfatide 58
 Glicină 144, 533
 Glicocalix 74
 Glicogen 56, 532, 535, 547, 551, 682, 687, 1018
 Glicogenoliză 156, 547, 685
 Glicolipide 58, 72
 Glicoliză 67, 157, 268, 434, 548, 550, 1018
 Glicoproteine 56, 72
 Glicozurie 578, 602, 997
 Glisare 154, 156, 807
 Globină 200, 201, 510
 Globuline 55, 196, 558
 Globus pallidus 884, 947
 Glomerul 564, 567, 570
 - olfactiv 877
 Glomerulonefrită 608
 Glucagon 309, 492, 502, 513, 547, 681, 685-686, 687
 Glucide 56, 72, 228, 455, 462, 463, 551, 559, 656
 Gluconeogeneză 551, 559, 656, 685, 686
 Glucostat 945
 Glucoză 56, 267, 516, 531, 532, 546, 547, 548, 550, 551, 682, 684, 687, 798
 Glucoză 6-fosfat 547-548
 Glucozo 6-fosfatază 547
 Glucuronil transferază 510
 Glutamină 592
 Glutation 53
 GMP ciclic 111, 147, 351, 606, 607, 768, 968, 969
 Gonade 664
 Gonadoliberină (GnRH) 637, 647, 669, 673
 Gonadotropine (LH, FSH) 646-648, 665, 667, 669, 670, 673, 674, 736, 758
 - corionice 648, 673, 736
 Granulocite 209
 - bazofile 209, 214
 - eozinofile 209, 211, 212
 - neutrofile 209, 211, 212, 228
 - polinucleare 209
 Granulomer 228
 Granulopoietină tisulară 211
 Granulopoieză 209-211
 Greată 499
 Grelină 719
 Greutate moleculară 53
 Grosime eritocitară medie (GEM) 195
 Grupe sanguine 207
 GTP 109, 110
 Guanilat ciclază 111, 112, 969
 Guanină 54
 Gușă 644, 645

H

Haptene 221
 Hauste 523
 Helicotremă 843
 Heliu 1012
 Hem 200, 201, 203, 424, 426, 430, 431, 567
 Hematie 193-196, 206
 Hematocrit 180, 181, 318

Hematom retroplacentar 752
 Hematopoieză 196-199
 Hemeralopie 859
 Hemianopsie 858
 Hemodiluție 196
 Hemofilie 237
 Hemoglobină 195, 200, 420, 423-429, 510, 511
 - „A” 201, 425
 - „C” 202
 - embrionară („U”) 202
 - eritocitară medie (HEM) 195
 - fetală 202, 425, 735
 - redusă 195, 424
 - „S” 202
 Hemoglobinopatii 202
 Hemoliză 194, 205, 206
 Hemoragie 229, 237, 371
 - cerebrală 383
 Hemosiderină 202
 Hemostază 227, 229-230, 235, 237, 752
 Heparină 232, 236, 449
 Heterofagie 67
 Heteroproteine 53
 Heterozide 56
 Hexametoniu 715
 Hexokinază 683
 Hialoplasmă 228
 Hialuronidază 604
 Hidrogen 39, 40, 339, 364, 434, 435
 Hidropenie 651
 17-Hidroxicorticosteroizi 655
 Hidroxiprolină 533
 Hiperaciditate 496
 Hiperaldosteronism 595
 Hiperalgie 954, 962
 Hiperbarism 196, 1010
 Hipercalcemie 690, 692
 Hipercaapie 309
 Hiperchromie 195
 Hiperemie 315, 339, 362, 364
 Hiperextensie 807
 Hiperfagie 944
 Hiperlglicemie 641, 685, 686, 687, 997
 Hiperhidratare 179, 573
 - celulară 179
 - extracelulară 179
 - globală 180
 Hiperkaliemie 659
 Hipermetropie 852
 Hipermetropie 659
 Hiperosmie 880
 Hiperosmoză 178, 651
 Hiperoxie 1011
 Hiperparatiroidism 691
 Hiperpnee 442, 1021
 Hipersensibilitate de denervare 153, 154
 - întârziată 216
 Hipertensiune 322, 323, 334, 337, 340, 341, 595, 597, 658
 Hipertiroidie 645, 678
 Hipertonie osmotică 950

- Hipertrofie cardiacă 282
 - musculară 799
 - ventriculară 998
 Hiperventilație pulmonară 336
 Hipervolemie 179, 183, 659
 Hipoaciditate 496
 Hipocalcemie 692, 694
 Hipocamp 947
 Hipocapie 420
 Hipocromie 195
 Hipoderm 618
 Hipofizectomie 634, 636, 640
 Hipofosfatemie 690, 694
 Hipogeuze 873
 Hipoglicemie 489, 641, 682, 686, 687
 Hipokaliemie 658, 659
 Hipomagneziemie 693
 Hiponatremie 659
 Hiposmuc 880
 Hiposmucă 179, 651
 Hipoparatiroidism 692
 Hipotalamus 334, 336, 442, 489, 495, 604, 635, 644, 899-900, 946, 958, 963
 Hipotensiune 322, 333, 340, 341, 342
 Hipotiroide 677, 678
 Hipovolemie 179, 183, 951
 Hipoxemie 420
 Hipoxie 199, 230, 309, 364, 380, 381, 392-393, 595, 596, 753, 959, 994, 996, 997, 998
 Histamină 134, 141-142, 161, 214, 220, 340, 364, 373, 378, 392, 445, 481, 493, 495, 502, 513, 702-703, 953
 Histereză pulmonară 403
 Histidină 142, 340, 457, 702
 Histone 53, 62
 Holoproteine 53
 Inlozide 56
 Homeostazie 167, 168, 169, 330, 345, 352, 563, 908, 980-984
 Homeotermie 184
 Homunculus 883
 - senzitiv 830
 Hormon adrenocorticotrop (ACTH) 622, 641-644, 657, 658, 659, 719, 754, 969
 - de creștere (somatotrop, STH) 473, 559, 638-641, 671, 679, 687, 756, 781
 - lactogen placentar 756
 - melanotrop (MSH) 621, 649
 - paratiroidian (PTH) 606, 688, 690-694, 781
 - tireotrop (TSH) 644-645
 Hormoni 103-105, 631-634
 - adenohipofizar 635
 - anabolizanți 55
 - androgeni 211, 555, 622, 623, 647, 672, 754
 - catabolizanți 55
 - corticopararenali 309, 654-655, 754, 994
 - estrogeni 228, 555, 608, 622, 623, 641, 646, 647, 665, 666, 667, 668, 671, 737, 750, 756, 757
 - gastro-intestinali 684, 713
 - glucocorticoizi 557, 559, 642, 653, 655-657
 - gonadotropi 646
 - hipofizotropi hipotalamici 637
 - locali 104, 631, 701
 - medulosuprarenali 660-664
 - mineralocorticoizi 653, 658, 659
 - retrohipofizari 650
 - sexoizi 659-660, 781
 - tiroidieni 551, 557, 622, 623, 625, 674-680, 754, 781, 993-994

I

- Icter 511, 608
 - neonatal 759
 Idsop 226, 227
 Ileon 468, 515
 Imerie 1012
 Imponderabilitate 1005-1008
 Imunitate activă 227
 - artificială 227
 - celulară 217, 218, 219, 226
 - naturală 227
 - nespecifică 217, 218
 - pasivă 227
 - specifică 217
 - umorală 217, 218, 227
 Imunogen 221
 Imunogenitate 220, 221
 Imunoglobuline 222, 223, 226, 447, 747
 Incluziuni celulare 70
 Indice cardiac 287-288
 - de culoare (valoare globulară, VG) 195
 - Tiffeneau 410
 Inervație motorie 790
 - parasimpatică 616, 866, 901, 905, 907
 - a inimii 307, 308
 - plămânului 393, 394
 - senzitivă 790
 - simpatică 616, 866, 901, 902, 905, 907
 - a inimii 307
 - vegetativă 902
 Infarct miocardic 382
 Inflamație 364
 Inflexie 807
 Inhibină 669, 670, 671
 Inhibiție laterală 828
 - presinaptică 828
 - recurentă 828
 - Vedenski 127
 Inimă 243
 Inozitol trifosfat 112, 137, 604
 Inspirație 394, 406
 Insuficiență cardiacă 371
 - renală 610
 - respiratorie 406
 Insule Langerhans 681
 Insulină 489, 495, 549, 553, 557, 606, 640, 681-685, 688, 781
 Integrare somato-vegetativă 824-825, 909
 - vegetativă 908
 Inteligență 973
 Interfază 69
 Interferon 220, 224, 447, 628
 Interleukine 219, 223, 224, 628
 Interneuron 817
 Internod 125, 817
 Interoceptori 819

- Intervale (ECG) 297, 300
 Intimă 787
 - vasculară 313
 Invertază 516
 Iod 49, 461, 645, 674, 680
 Iodopsină 859
 Ionofori 91
 Ionogramă sanguină 610
 Iradiere 916, 989-990
 Ischemie 302, 341, 373, 961
 Istm oro-faringian 477
 Izoionie 179
 Izoleucină 457
 Izomaltaze 531
 Izoprenalină 444
 Izoreline 594
 Izostenurie 608, 613
 Izotonie 607
 Izovolemie 607
- J
- Jejun 468, 515
 Juncțiuni celulare 102
 - de contact 161
 - difuze 161
 - neuro-musculare 53, 792
- K
- Kalicreină 232, 340, 341, 365, 447, 470, 598, 710, 711, 712
 Kalicreinogen 340, 598, 710, 712
 Kalidină 710
 Keratină 618, 619, 620
 Keratinizare 618
 Keratinocit 618, 619, 628
 Keratinozom 619
 Keratină 852
 Keratogeneza 620
 Kinemogramă 808
 Kinestezie 835
 - articulară 836
 - musculară 836
 - tendințasă 837
 Kininază 710
 Kinine 232, 710, 711, 712
 Kininogen 232, 234, 340, 598, 710, 711, 712
 Kininogenaze 710, 711, 712
- L
- Labferment (presură, cheag) 486, 487, 533
 Labirint membranos 838
 Lactaje 648, 652, 757, 758
 Lactază 516, 531, 757
 Lactic dehidrogenază 608
 Lactoferrină 219
 Lactoză 516, 531
 Lamină fibroasă 62
 Lanț nuclear 834
 - respirator 267
 Lanțuri grele (H) 222, 223
 - ușoare (L) 222, 223
 Laringe 450
 Latență 914
 LATS 645, 680
 Lecitinază 505, 534
 Lecitină 405, 511, 555
 Legătură peptidică 54
 Legea Boyle-Mariotte 411
 - Dalton (presiunilor parțiale) 411
 - Franck-Starling 271
 - Gay-Lussac 411
 - Hagen-Poiseuille 568
 - Henry 411, 430
 - inexcitabilități periodice 259
 - Laplace 568
 - Nerast 117
 - perinadei refractare 850
 - „tutur sau nimic” 260, 850
 - Van t'Hoff 418
 Leptină 724
 Leptocitoză 196
 Leu-enkefalină 719
 Leucin amino-peptidază 505, 533
 Leucină 533
 Leucodine 212
 Leucocite 208, 209, 219
 Leucocitoză 208
 Leucopenie 209
 Leucotoxine 212
 Leucotriene 219, 445, 448, 725, 726, 727
 Leziune 302, 303
 Liberine 635, 637
 Lichid amniotic 727, 738
 - cefalorabidian 978
 - endolimfatic 839
 - folicular 646
 - pleural 397, 398
 - sinovial 787, 788
 Limbaj 974
 Limfatice 374, 375
 Limfă 376
 Limfocite 209, 216
 - „B” 216, 217, 218, 220, 222, 223, 225, 226
 - „T” 216, 217, 220, 221, 222, 223, 224, 628
 - citotoxice (Tc) 224
 - helper (Th) 224, 225, 226
 - supresoare (Ts) 224, 226
 Limfokine 216, 223, 226
 Lipază gastrică 487, 534
 - intestinală 517
 - pancreatică 505, 534
 - salivară 470
 Lipide 57-59, 71, 228, 455, 456, 462, 463, 552
 Lipogeneza 59, 448
 Lipoliză 59, 448
 Lipopexie 448

Lipoproteine 53, 553
 Lipostat 949
 Lipotropine 636
 Lipoxigenază 725, 727
 Lipoxine 445, 446
 Lizină 457, 684
 Lizolectină 206
 Lizozim 213, 219, 447, 470, 486, 487
 Lizozomi 66-67, 213, 219
 Lob floculo-nodular 888
 Lobuli hepatici 508
 - pulmonari 389
 Locomoție 779, 799, 803-806
 Locus coeruleus 946
 Lucru mecanic cardiac 288-289
 Luteoliză 665

M

Macrofagocitoză 195
 Macroelemente 40, 41
 Macrofage 214-216, 223, 226, 230
 - alveolare 447
 Macroglie 817
 Macropinocitoză 102
 Macula adherens 245
 - densa 569
 - lutea 853, 861
 Magneziu 39, 44, 214, 461, 539
 Maltază 516, 531
 Maltoză 516, 530, 531
 Mandibulă 474
 Mangan 49
 Marker CD 224, 225, 226
 Masa celulelor parietale 493
 Masticatie 474-477
 Mastocite 209, 211, 212, 628, 702
 Matrice citoplasmatică 61, 63
 - extracelulară 780, 781
 Măduvă osoasă 783
 - spinării 886, 901, 957
 Mecanism reflex condiționat 473, 488
 -- necondiționat 472, 489
 Mecanoreceptori 819, 820, 826
 Mediatori chimici 131, 134-148, 637, 641, 669
 Mediație adrenergică 137-140
 - colinergică 135-137, 904
 - dopaminergică 139-140
 - purinergică 146-147
 Mediul extracelular 62
 - hiperbaric 1010
 - intern 167
 Medulină 596
 Medulosuprarenală 653
 Megacarioblast 227
 Megacariocit 227, 231
 Melanină 620, 649
 Melanocit 620, 649
 Melanogeneză 620, 622
 Melanozom 620, 649
 Melatonină 695, 696, 697, 704

Membrană alveolo-capilară 385, 389, 412
 - bazilară 843, 844, 845
 - celulară (plasmalema) 61, 70-74
 - eritocitară 205
 - excitabilă 116
 - filtrantă glomerulară 570
 - inexcitabilă 116
 - intracelulară 61
 - neuronală (nucleoplasmă) 62
 -- postsinaptică 133
 - Reissner 843
 - tectoria 844
 - Z 164, 245
 Memorie 964-969
 Menopauză 670-775
 Menstruație 665, 667, 668
 Meromiozină 156
 Mers 808
 Metabolismul aerob 999
 - anaerob 999
 - bazal 560-561, 739, 745
 - hidrocarbonatelor 543, 546, 754
 - intermediar 546
 - lipidelor 543, 551, 754
 - proteinelor 544, 557, 754
 Metamielocit 209
 Metanefrină 661
 Met-enkefalină 144, 145, 720
 Methemoglobină 195, 205
 Metilprednison 655
 Metionilkalidină 710
 Metionină 457
 Metodă Astrup 190
 - Fick 285, 611
 5'-Metoxitriptamină 704
 Mg²⁺-ATPază 259
 Miastenie 153
 Miceli 71, 534
 Microfagocitoză 195
 Microelemente 39, 47
 Microfagocitoză 88
 Microglie 817
 Micropinocitoză 88, 102
 Microtrabecule 69
 Microtubuli 69
 Micțiune 616
 Midriază 865, 866, 867, 868
 Mieloblast 209
 Mielocit 209
 Mieloperoxidază 219
 Mineral osos 782
 Mineralizare 782
 Miocard 244, 378
 Miofibrile 149, 779
 Miofilamente 156, 245, 264
 Mioglobină 150, 797, 998
 Miokinază 798
 Miometru 748, 751
 Miopie 852
 Miotonie 153
 Mioză 865, 866, 868
 Miozină 151, 152, 154, 156, 164, 228, 245, 265, 268

Mișcări automate (involuntare) 808
 - voluntare 807, 808
 Mitochondrie 67-68
 Model în „mozaic lichid” 73
 Molibden 49
 Monoamine biogene 702, 948
 Monoaminoxidază (MAO) 140, 342, 449, 661
 Monoblaste 214
 Monocite 209, 214, 215
 Monogliceride 534
 Monohidroliză 59
 Monokine 223
 Monomeri 73
 Morfină 720
 Motilin 494, 502, 522, 717
 Motilitate biliară 514-515
 - esofagiană 478-481
 - gastrică 496, 503
 Motilitatea intestinului gros 522-524
 -- subțire 519, 521
 Motoneuroni 159, 790, 886, 889
 Motricitate holokinetică 882, 883, 889
 - ideocinetice (telecinezic) 882, 889
 Mucină 470, 487, 511, 516
 Mucinogen 469
 Mucoasă hucală 468
 - gastrică 468
 - intestinală 516
 - olfactivă 876
 Mucus 447, 485
 Mugure gustativ 820, 869, 872
 Muremur vezicular 450
 Mușchi agonști 789
 - antagonști 789
 - netci 154
 - scheletic 149, 154, 369, 383, 789
 - sinergiști 789
 - subhioidieni 474

N

NAD 434, 549, 551
 NADP 434, 551
 NADPH 551
 Na⁺, K⁺-ATPază 99, 252, 259, 576, 605, 676
 Nanism hipofizar 636, 637
 Narcoză 1011
 Naștere 748, 752, 753
 Natriureză 342, 598, 600, 601, 602
 Necesari caloric 454
 - de celuloză 462
 -- glucide 455
 -- lipide 455-456
 -- minerale 458
 -- proteine 456-457
 -- vitamine 458-461
 - hidric 461
 Necrotactism 215
 Necroză 302, 303, 373
 Nefrectomie 597
 Nefrogramă 614
 Nefron 564

Neocerebel 883, 887
 Neocortex 881, 958,
 Neoretinol 859
 Neostigmină (prostigmină) 153
 Nerv acustic 848
 - coarda timpanului 472, 871
 - facial 472, 478, 483
 - glosolaringian 333, 472, 478, 483, 871
 - hipogastrie 521, 616
 - intermediar Wriesberg 472
 - Jacobson 472
 - pneumogastrie 333, 512, 518
 - optic 855, 856, 867, 868
 - rușinos iotern 616
 - splanhnic 506, 512, 518, 521, 524, 603
 - trigeminal 472, 483
 - vag 483, 338, 480, 481, 506, 513, 517, 521, 524, 685, 686
 - vestibular 836
 Neuroblasti 818
 Neurofibrile 815
 Neurofilamente 815
 Neurofizică 650
 Neurohipofiză 634
 Neurokinină 445
 Neuromedatori 104, 134-135
 Neuromodulatori 134-135
 Neuron 116, 816-817, 818
 - motor 817
 - senzitiv 817, 821
 Neuropeptid Y (NPY) 146
 Neurotensină 342, 719, 722-723, 948
 Neurotransmitere gazeoasă 147
 Neurotubuli 817
 Nevroglie 815, 817-818
 Nexus 245
 Niebel 49-50, 205
 Nistagmus 841
 Nocceptori 820, 626, 952
 Nod Ranvier 817
 Nodul atrio-ventricular 247
 - sinusal 247
 Noradrenalină 137, 161, 338-339, 363, 381, 383, 502, 563,
 660, 661, 662, 697, 866, 994
 Normetanefrină 661
 Nou-născut 759-761
 Nucleare 516, 533
 Nuclei bazali 884
 Nucleol 62
 Nucleoproteine 53
 Nucleotidaze 533
 Nucleotide 533
 Nucleozidaze 533
 Nucleozom 62
 Nucleu 62, 815
 - accumbens 946, 947
 - Bechterew 835
 - caudat 884, 947
 - cuneatus 827
 - dorsal al vagului 445
 - Edinger-Westphal 866, 867, 900
 - gracilis 827
 - paraventricular 635, 650

Nucleu subtalamic 884
 - supraoptic 635, 650
 - ventral anterior 947
 - - - postero-lateral 829
 - - - medial 829
 - von Monakow 835
 Nucleul tractului solitar 334, 438, 440, 871

O

Obecitate 177, 948, 949, 1025
 Oboselă musculară 796
 - nervoasă 127, 1003
 Ocuzie 915
 Octopamină 704
 Olfactometrie 880
 Oligodendroglică 817-818
 Oligoelemente 47-51
 Oligopeptide 53
 Oligozide 56
 Oligurie 608, 997
 Opioid 144, 719-721
 Opsină 853, 859
 Opsinice 613
 Opsinice 212, 213, 220
 Ora serrata 853
 Organ Cori 820, 844
 Organe efectoare 914
 - otolice (utriculă, saculă) 839, 841
 Organite celulare 61, 70
 - specifice 70
 Ornitină 559
 Ortostatism 799, 802-803
 Os 780, 782, 784
 Oscilometru Pacbon 325
 Oseină 782
 Osmolaritate 538, 587, 588, 651
 Osmometru 189
 Osmoză 78-79, 96, 486
 Osteoblaste 689, 691, 694, 780
 Osteocite 780, 949
 Osteoclaste 690, 691, 694
 Osteogeneză 780
 Ostenid 780, 782
 Osteoliză 689-690, 781
 Osteon 783
 Osteoporoză 772, 782
 Osteosinteză 690, 781
 Otulie 832
 Ovare 664
 Ovocit 664
 Ovogeneză 664
 Ovul 646, 664-665
 Ovnale 646, 664, 669
 Oxid de carbon 424, 426, 429
 Oxid nitric 350
 Oxigen 41, 382, 383, 385, 414, 415, 420-430, 432-434, 436, 437, 440, 550, 797
 Oxihemoglobină 191, 200, 205, 424
 Oxinocină 161, 502, 652-653, 750, 751, 757, 969
 Oze 56
 Ozide 56

P

Paleocerebel 887
 Paleocortex (rimencefal) 335
 Pancreas 503, 681
 Pantă limită 123
 Papile gustative 468, 869
 Parageuzie 873
 Paratiroid 688
 Paratop 223
 Parestezii 962
 Patch-clamp 91
 Pavilionul urecții 842
 Pâr 622
 Pârghii osoase 805-806
 Pedunculi cerebrali 923, 924
 Pentagastrină 491
 Pepsină 481, 486, 532
 Pepsinogen 486, 532
 Peptid inhibitor gastric (GIP) 492, 494, 714-715
 Peptide 53
 - opioid 948
 Percepție 964
 Perfrine 220
 Pericard 243
 Pericardiu 815
 Perilimfă 845
 Perimisium 789
 Perioada răspunsului ideal gradat 259
 Perioadă de latență 115, 121-122
 - - - revenire completă 259
 - - - parțială 259
 - refractară 153, 259
 - absolută 122, 153, 259
 - relativă 122, 153
 - supranormală 259
 Perist 783
 Permeabilitate selectivă 118, 150, 205
 Peroxizomi 68-69
 pH 189, 190, 191-193, 427, 428, 755
 pH-ul bilei 509
 - gastric 484, 485, 486, 487
 - intestinal 516, 517
 - pancreatic 503, 504, 505
 - plasmic 191, 592
 - salivă 470
 - sanguin 190-191, 192, 193
 - urinar 589, 592-593, 608
 Phaeomelanină 621
 Piele 618, 626, 627, 629
 Pigmentare 621, 622, 649
 Pigmenți biliari 206, 510
 Pilocarpină 472, 518
 Pilogeneză 622
 Pilor 498
 Pinocitoză 67, 88
 Piramidă Malpighi 614
 Pirimidine 170
 Pirogen 214, 219
 Piorie 608
 Placă motrică 130, 153, 792
 Placentă 734-737, 749, 752-753, 755

INDEX ALFABETIC

Plan anatomic 806-807
 Plasmakinine 53, 340, 598
 Plasmă 175-176, 182
 Plasmină 232, 235, 236, 449, 712
 Plasmongen 236, 449, 712
 Plasmocite 217, 222, 225
 Plasmocitom 184
 Platieitoză 195
 Plămân 385, 388, 389, 396, 417, 446
 Pletismograf 329, 397
 Pleură 389-400
 Plex Auerbach 500, 521, 528
 - cardiac 307
 - Meissner 500, 521
 - mienteric 523
 - solar 569
 - venos peribronșic 389
 - - submucos 389
 Plexuri periviscerale 902
 - prevertebrale 902
 Pneumocite 387, 388
 Pneumogramă 407
 Pneumotorax 439
 Podocite 570
 Polikiloterme 988
 Polakturie 618
 Polaritate electrică 150
 Policitemie 183
 Poliernmatism 862
 Polidipsie 950
 Poliglobulie 181, 196, 997, 998
 Polihexozamine 56
 Polinzie 56
 Pnlipeptid pancreatic 681, 686, 718-719
 - vasoactiv intestinal (VIP) 342, 445, 492, 494, 499, 502, 518, 713, 714
 Pnlipeptide 144, 146
 Poliurie 602, 608, 618
 Poliuronide 56
 Polizomi (poliribozomi) 54, 63
 Pompă activă 81, 506
 Pool mitotic 210
 - neuronal 915
 Porfirropsină 859
 Porfobilinogen 201
 Pori membranari 356
 - nucleari 62
 Postpotențial negativ 122
 - pozitiv 122
 Postură 799-802, 803
 Potasiu 43, 381, 461, 471, 538, 582-583
 Potențial de acțiune (PA) 108, 119, 121, 122, 129, 152, 160, 161, 822, 912
 - - - al fibrei miocardice 259, 261, 262, 263
 - - - cncpus 126
 - - echilibru 117, 118
 - - receptor 821, 822, 823, 912
 - - repaus 116, 117, 118
 - - - al fibrei miocardice 257, 259
 - electrochimic 116
 - postsinaptic excitator (PPSE, EPSP) 108, 130, 148
 - - inhibitor (PPSI, IPSP) 108, 130, 148
 Prag auditiv 847, 848
 - de excitație 119, 953, 954
 - gustativ 873
 - olfactiv 879
 Praxie 883, 896
 Prednison 655
 Pregnanđiol 666
 Presbiție 852
 Presiune arterială 321, 323, 329, 330, 600-601
 - atmosferică 995
 - barometrică 1001, 1003, 1004
 - enloidosmotică (onconică) 53, 178, 189, 360, 361, 370, 417, 418, 571, 572, 574, 576, 600
 - convergență 327
 - diastolică 325, 327
 - diferențială (presiunea pulsului) 322, 327
 - divergență 327
 - hidrostatică 178, 360, 370, 371, 417, 418, 571, 574, 576, 601
 - intracapsulară (intrarenală) 571
 - medie 325, 327, 361-362
 - osmotică 96, 178, 189, 418, 587
 - parțială a O₂ și CO₂ 393, 411, 414, 415, 416, 419-420, 430, 436, 440
 - pleurală 398, 399, 400
 - sistolică 324, 325, 326
 - sistolo-diastolică 324
 - venoasă 370
 Presiunea vaporilor de apă 411
 Presoreceptori (baroreceptori) 333
 Proaccelerină 231, 234
 Probaotină 495
 Probă cu fenolsulfonfaleină (PSP) 613
 - - pilocarpină 625, 626
 - de diluție și concentrare 613
 - Rosenthal 625, 626
 - Valsalva 369, 371
 Procarote 61
 Proconvertină 231, 234
 Prodinnrfină 719
 Proenkefalina 719
 Progesteron 622, 646, 647, 654, 665, 666, 667, 669, 670, 737, 749, 756
 Prolactină (PRL) 648-649, 666, 673, 756, 757
 Prolină 533
 Promegacariocit 227
 Promielocit 209
 Promonocit 214
 Proopiomelanocortin 621, 636, 637, 641, 719, 737
 Properdină 219
 Proprioreceptori 819, 820
 Prostaciline 351, 365, 381, 445, 448, 724, 727, 953
 Prostaglandine 179, 213, 219, 341-342, 365, 373, 392, 445, 448, 493, 522, 596, 597, 598, 602, 622, 671, 712, 725-727, 750, 866-867, 953
 Prostată 699
 Protaminaze 505, 533
 Protamine 53
 Protein kinază A 112, 164, 604
 - - C 112, 113, 604
 Proteină C reactivă 220

Proteine 52–55, 228
 – G 109, 110, 140, 145, 163, 164, 456–458, 462, 463, 557
 Proteinemie 609–610
 Protein-tirozio fosfataze 114
 Prode 53
 Protodiasistolă 277
 Protoporfirină 201
 Protrombină 231, 233, 234, 238
 Pseudopode 230, 779
 Pitalină 530
 Pubertate 670, 673, 764, 765
 Puls arterial 325, 327–328
 – total (volumetric) 328, 329
 – venos 371
 Punct izoelectric 53
 – proxim 868, 869
 – remotum 868, 869
 Putamen 884, 947

R

Radicali liberi 311, 384, 421, 422, 769, 770
 Rahitism 782
 Rampă cohleară 843
 – medie 845
 – timpanică 843
 – vestibulară 843
 Randament cardiac 289
 Rata filtrării glomerulare 600
 Rație alimentară 462–466
 Răspuns celular 90, 110
 – local 90
 Reabsorbția apei 582, 601, 603–606
 – bicarbonatului 590–591
 – calciului 606–607
 – glucozei 577–579
 – magneziului 606
 – potasiului 582–583
 – proteinelor 584
 – sodiului 579–582, 601, 605
 – tubulară 573–576, 584, 600
 Receptori 104–109, 110, 912
 – adrenergici 105, 139, 140, 309, 381, 444, 445, 662, 663
 – colinergici 136, 792
 – „M” (muscarinici) 105, 137, 309, 444
 – „N” (nicotinici) 136, 137, 139
 – dopaminergici 140, 662
 – „H” (histaminici) 142, 493, 702, 703
 – hormonalii 633
 – „I” (de iritație) 439
 – „J” (juxtacapilari) 394, 439
 – kinestezici 833
 – opioizi (Mu, Kappa, Delta, Sigma, Epsilon) 720–721
 – pentru antigen (TCH) 224, 225
 – purinergici 146–147
 – senzitivo-senzoriali 812–813, 823
 – serotoninergici 141, 702
 Reciclare medulară 585
 Rect 469, 523
 Reflex ano-gastric 502
 – Aschner-Dagnini 333
 – auditiv de elipire 885, 923

Reflex auditiv-cefalogir 842
 – auditiv-oculogir 885, 923
 – Babinski 760, 920
 – Baiobridge 333, 371
 – Bezold-Jarish 333, 382
 – cornean de elipire 851, 885, 923
 – Cushing 336
 – de acomodare la distanță 869, 924
 – coborâre a mandibulei 476
 – convergență 869
 – extensie 918–919
 – – încrucișată 919–920
 – flexione 918
 – ioflație 439
 – masticăție 922
 – pășire 920
 – ridicare a mandibulei 476
 – sucțiuoe 922
 – duodeno-colic 524
 – entero-enteric 522
 – entero-gastric 501
 – excitoinspirator 439
 – fotomotor 867, 924
 – gastro-colic 524
 – ileo-gastric 502
 – inhibitoinspirator 439
 – iridoconstrictor 851
 – lacrimal 851, 922
 – masticator 475, 885
 – maseterian 922
 – mienteric 517, 521
 – Moro 760
 – Peiper 760
 – Phillipsoo 920
 – salivar 922
 Reflexe condiționate 970–973
 – cutanate 920
 – de redresare 885, 887, 925–926
 – exteroceptive 911, 916
 – interoceptive 911
 – labirinto-kinetice 926
 – mezencefalice 923
 – miotatice 159, 476, 801, 837, 916–918
 – oculo-cefalogice 885, 921, 925
 – proprioceptive 911, 916, 925
 – protuberanțiale 922–923
 – pupilare 924
 – somatice bulbare 921
 – medulare 916–920
 – statice 925, 926
 – statokinetic 885, 887, 925, 926
 – vago-vagale 506
 – vegetative bulbare 921–922
 – medulare 920–921
 – vestibulare 926
 Reflux gastro-esofagian 480
 Reglarea activității inimii 305–307
 – bronhomotricității 444–446
 – circulației capilare 363–365
 – cerebrale 382–383
 – coronariene 380–382
 – venoase 373

Reglarea deglutiției 481–483
 – evacuării bilei 513–514
 – funcției motorii a colonului 524
 – renale 602
 – secretoare a colonului 523
 – genetică 169
 – motilității biliare 512
 – gastrice 500
 – intestinale 521–522
 – presiunii arteriale 330–331
 – respirației 437–440
 – secreției biliare 512–514
 – gastrice 487
 – intestinale 517
 – pancreatice 506
 – salivare 472–473
 Relaxare (izometrică, izotonică) 154–155, 277–278, 371–373
 Relaxio 738
 Remanență 860
 Renin-like 594
 Reoină 341, 365, 582, 595
 Reoinemie 594
 Reobază 119
 Repolarizare 122, 151, 153, 258, 259
 Reprezentare 964
 Reserpină 339
 Respirație 743–744
 – celulară (internă) 385, 386, 434
 – pulmonară (externă) 385, 386, 387
 – tisulară 432–434
 Retenție de urină 616, 618
 Reticul endoplasmatic 64–65, 854
 – sarcoplasmatic 252
 Reticulocit 198
 Retină 851, 858–861, 863
 Rețea Purkinje 248
 Revoluție cardiacă 273, 274, 278–281
 Rezervă alcalină 190, 610
 Rezistență globulară 205
 – la flux 401
 – periferică 322, 401
 – pulmonară 401
 – tisulară 401
 – vasculară 316–317, 323
 Ribonucleaze 505
 Ribozomi 54, 63
 Rigiditate de decerebrare 885, 886, 926
 Rinencefal 958
 Rinichi 563, 564–566, 742–743
 Ritm cardiac (sinusal, nodal, idioventricular) 247, 262, 1020
 Ritmicitate 262
 Ritmuri circadiene (oictemerale) 943, 985, 986
 Rodopsină 853, 859
 Rotație 807

S

Sac nuclear 834
 Saculă 835
 Salivă 469–473, 872
 SAOS 443
 Sarcolemă 149, 244, 252

Sareomer 149, 245, 252
 Sarcoplasmă 252
 Sarcozomi 798
 Saturație în oxigen 425
 Saxitoxină (STX) 91
 Săruri biliare 509, 510, 511, 513, 534, 539, 540
 – minerale 60
 Sânge 182–186, 771
 Scintigrafie renală 614
 Scizură Sylvius 502
 Scleroproteine 53
 Scoarță calcarină 864
 Scotom 859
 Sebum 623–624
 Secretină 481, 492, 494, 502, 507, 513, 514, 518, 522, 686, 714
 Secreția intestinului gros 522–524
 – subțire 515
 – sucului intestinal 516
 Secreție biliară 508, 509–511, 514
 – esofagiană 478–481
 – gastrică 484–487, 495
 – pancreatică 503–506, 508
 – salivară 469–470
 – sudorală 625, 993
 – tubulară 574, 577, 589–590
 Secusă 153, 794, 805
 Sediment urinar 609
 Segmente (ECG) 297, 299
 Selenio 48
 Senesceolă 767–770
 Sensibilitate exteroceptivă 825
 – interoceptivă 831–832
 – mio-artrokinetică conștientă 835
 – – incoștientă 835
 – proprioceptivă 832–833
 Senzație 964
 – auditivă 848
 – cromatică 862
 – de durere 952
 – foame 944–946
 – sațietate 945
 – sete 950
 – gustativă 871, 873
 – luminoasă 860
 – olfactivă 878–880
 Serină 113
 Serio-treonin protein fosfataze 114
 Serotonină 140, 141, 220, 228, 229, 232, 340, 364, 373, 381, 392, 441, 445, 502, 522, 524, 703–704, 960
 Sept interventricular 276
 Sferocitoză 196
 Sfigmogramă 274, 328
 Sfincter anal 526
 – esofagian 480
 – ileo-cecal 519
 – Oddi 503, 510, 512
 Sfinolipide 58
 Sfinomielină 58, 555
 Sfinozine 113
 Sialomucioe 405
 Sialoree 473
 Siclemie 202

Sigmoid 523
 Siliciu 39, 48-49
 Simpatectomie 500, 521, 697
 Sinapsă 127-130, 818
 Sinartroză 784
 Sincopă 996
 Sincronizator 985-986
 Sindrom carcinoid 703
 - de preexcitare (WPW) 247
 - Horner 867
 - nefrotic 608
 Sinereză 196
 Sinovială 787
 Sinus (corpuscul) carotidian 333
 Sistem anex 823
 Sistemul antigenic ABO 208
 - chalon-antichalon 211
 - complement 212, 219, 220
 - cordonelor antero-laterale 830-831
 - - posterioare 827-828
 - endocrin 746
 - - difuz (APUD) 388, 516, 701, 702, 720
 - energogen miocardic 267
 - factorilor granulocitari 211
 - fibrinolitici 712
 - hipofizo-corticosuprarenal 211, 643, 907, 1022
 - hipotalamo-hipofizar 635, 645, 648, 696, 749, 900
 - imun 219, 220, 223, 226
 - kininogenaze-kinine 710, 711
 - limbic 442, 946, 976-977
 - - mesagerilor primari 103-104
 - - secunzi 108, 110
 - motor somatic 813
 - - vegetativ 813
 - nervos 745-746
 - - extranevraxial 811
 - - intranevraxial 811
 - - somatic 812
 - - vegetativ 603, 812, 897, 898, 899, 901, 904
 - neuro-muscular 149
 - parasimpatic 337, 444, 488, 500
 - renină-angiotensină 179, 341, 342, 345, 594-595, 598, 601-602, 659, 705-706, 707, 708, 711
 - reticulo-endotelial 204, 214, 951, 982
 - senzitivo-senzorial 812, 819, 866
 - simpatic 337, 444, 488, 500, 513, 517, 678, 684, 686
 - simpatico-adrenergic 335, 337, 594, 661, 664, 697, 907, 1022
 - - colinergic 337
 - spino-talamic 827, 830
 - tubular transvers (STT) 152
 - valvular cardiac 369
 - vascular 311-315
 Sisteme tampon 191, 589, 591
 Sistolă atrială 274
 - ventriculară 276
 - - ectopică 304
 Situs 54, 105, 108
 Sodiu 42-43, 460, 470-471, 538, 540
 Solubilitate 53
 Somatoliberină (STH-RH) 637, 641, 687
 Somatomedină 639, 687, 781

Somatostatină 492, 494, 502, 637, 641, 679, 681, 686, 716-717
 Soma 931
 - lentă 934, 935
 - paradoxal 934, 936
 Sondă Einhorn 495, 503, 508, 514
 Spațiu extracelular 181
 - hidric total 181
 - intercelular (interstițial) 176, 181
 - intracelular 175, 181
 - intravascular (volemie) 176, 180
 - mort 407
 - sinaptic 128
 Spectrină 74
 Spermatogeneză 646, 670, 672
 Spermatozoizi 646, 670, 671
 Spermă 671
 Spermiatice 671
 Spermă 219
 Spike-potential 122
 Spirometru 408
 Splină 206
 Squalen 623
 SRSA 214, 445, 448, 726
 Statine 637
 Steatoree 535
 Stercobilină 511, 525
 Stercobilinogen 511
 Stereotip dinamic 894, 895
 Steride 58
 Steroidogeneză 649
 Stomac 468, 478, 484, 490, 496
 - Pavlov 489
 Strănut 441
 Streptokinază 236
 Stres 643, 981-984
 - oxidativ 421
 Stria vascularis 845
 Strie Hensen 245
 Stromă globulară 195
 Submersie 1008-1009
 Substanță gelatinoasă Rolando 955, 956
 - meagă 946
 - „P” 145, 342, 445, 502, 719, 722, 953
 Substanțe anorganice 608-609
 - antioxidante 770
 - coronarodilatatoare 380
 - emetizante 499
 - hidrofile 59
 - organice 608
 Suc gastric 484
 - intestinal 516
 - pancreatic 503
 Succinil coenzimă A (SucCoA) 200
 Sugar 761-765
 Suflori 319
 Sulf 76
 Sumație spațială 121
 - temporo-spațială 915
 Superoxid dismutază 421
 Suprafață entrocitară medie (SEM) 195
 Surditate 850-851
 Surfactant 387, 388, 403-406, 447

Ș
 Șoc anafilactic 227
 - hemolitic 207
 - spinal 886
 T
 Taenia coli 523
 Tahicardie 333, 334, 380, 753, 996, 998
 Tahipnee 408
 Talamus 255, 957, 963
 Taurină 144
 Teacă de mielină 817
 - Schwann 817
 Tehnică Westergreen 196
 Telangiectazie 237
 Telarhă 764
 Telogen 622
 Temperatură corporală 988-989, 992, 994-995
 Tendoane 789
 Tensilon 153
 Tensiune superficială a apei 59
 Teoria autocatalizei (Seegers) 235
 - cascadei enzimactice 233
 - inducției 605
 - ionică 121
 - permeazelor 605
 Termogeneză 563, 988, 989
 Termoliză 989
 Termoreceptori 819, 820, 826
 Termoreglare 160, 185, 1024
 Test Addis-Hamburger 607, 609
 - Biggs-Douglas 238
 - de toleranță la heparină 238
 - Ellsworth Howard 612
 - Hollander (insulină) 495
 - Kay 495
 Teste de fragilitate capilară 238
 - trombocitare 238
 Testicule 670
 Testosteron 559, 647, 654, 659, 672-674
 Tetanie 691
 Tetanos 153
 Tetraetilamooiu (TEA) 91
 Tetrameri 73
 Tetradotoxină (TTX) 91, 717
 Thalasemie 202
 Timină 54
 Timopietină 698
 Timozine 698
 Timp de circulație 374
 - - coagulare 238
 - - eiecție 322
 - - sângerare 238
 - - tromboplastină parțială 239
 - - - - activat 239
 - - - - Howell 238
 - - parietal 229
 - - plasmatic 230
 - Quick 239
 - trombocitar 229

Timpan 943
 Timulină 698
 Timus 217, 222, 224
 Tireoliberină (TRH) 637, 645, 679, 680
 Tireotrofină (TSH) 679, 680, 754
 Tiroglobulină 674, 675, 679
 Tiroidă 674
 Tiroidectomie 645
 Tirotropină placentară 737
 Tiroxină 309, 380, 559, 561, 645, 674, 675, 676
 Tirozin hidroxilază 660, 661
 - kinaze 113
 Tirozinază 620, 621
 Tirozină 138, 645, 660, 674, 675
 Tomitate 159, 273
 Tonofilamente 619
 Tonus bronhomotor 401, 446
 - capilar 362, 370
 - muscular 159
 - oterio 752
 - vascular 328
 - venos 367
 Trahee 387, 450
 Transcitoză 88
 Transcortină 655
 Transferină 202, 204, 539
 Transfuzie 207, 208
 Transport activ 75, 83-87, 98-101, 118, 419, 471, 485, 532, 574, 577, 579, 580, 582, 583
 - maxim 577
 - pasiv 75, 76, 80, 419, 471, 532, 574, 577
 - transmembranar 75-88
 Transportori 94-96, 419
 Travalu 748-752
 - ventilator 402
 Treonină 113
 Triadă Lewis 362
 Tributrină 470
 Trigliceride 517, 534, 535, 552, 555, 623
 Trihidrol 59
 Triiodtironină (T3) 645, 674, 675, 676
 Tripalmitină 58
 Tripsină 219, 504, 517, 532, 533
 Tripsinogen 504, 517
 Triptamină 704
 Triptofan 140, 340, 457, 517, 704
 Trofoblast 734
 Trombelastogramă 238
 Trombină 228, 230, 231, 233, 234, 235
 Trombocite 227, 228, 229, 232, 235, 238
 Trombocitoză 228
 Tromboflebită 369
 Trombopoieze 228, 237
 Tromboplastină 449
 - neutrofilă 214
 - plachetară 230
 - plasmatică 232
 - tisulară 231, 233, 234
 Trombopoieză 227, 228
 Trombostenină 228, 235

Tromboxani 213, 219, 230, 342, 365, 381, 445, 448, 602, 725, 727

Trombus 229, 230, 231, 232, 235

Trompă Eustachio 843

– uterio 665

Tropomioxină 152, 155, 156, 164, 245

Troponină 152, 154, 155, 156, 164, 245, 265

Trunchi cerebral 884–885, 900, 958

Tub digestiv 468

– distal 566, 573, 576

– proximal 565, 573, 574

Tubaj duodenal 514

Tuberculi cvadrigemeni 923

Tubocurario 153

Tuboli în „T” 154, 245

Turgor 762

Tuse 442

T

Tesut 167

– adipos 552

– bruo 994

– compact 783

– elastic 331

– fibros 313

– mezangial 565

– osos 783

– spongios 783

U

Ubiquinonă (coenzimă Q) 434, 550

Ulcer varicos 369

Ultrafiltrat glomerular 570

Undă anacrotă 328

– catacrotă 328

– diacrotă 328

Unde (ECG) 297–300

– antiperistaltice 521, 523

– peristaltice 513, 519, 521, 523, 524, 614

Unghii 622–623

Unitate motorie 782

Uracil 54

Urează gastrică 487

Ureche internă 843, 848–849

– medie 848

Uree 470, 487, 559, 584–585, 608, 610

Uremie 610

Ureter 614

Urină 569, 573, 742

Urobilină 511

Urobilinogeno 511

Urocrom 608

Urogastro 494, 718

Urokinază 236

Uroporfirinogen 201

Uter 652, 748, 751, 752

Utriculă 838

V

Vacuole 67

Vagotomie 488, 489, 490, 500, 506, 521, 948

Valină 457

Valve cooivente 515

Valvule 393

– atrio-ventricolare 248

– semilunare 248–249

Vasa recta 567

Vasoconstricție 229, 315, 323, 329, 333, 336, 337, 339, 340,

341–342, 383, 393

Vasodilatație 315, 323, 329, 334, 336, 337, 339, 340, 341–342,

382, 993

Vasomotricitate 315, 335, 383

Vasomotricitatea circulației pulmonare 392

Vasopresină (ADH) 178, 179, 333, 381, 502, 576, 582, 588,

603, 604, 625, 627, 650–651, 950, 969

Vâsco-elasticitate 463

Vâscozitate 53, 185, 318–319, 323

Vectocardiografie 304

Vector 291, 298, 304

Vedere binoculară 861–862, 864

– stereoscopică 864–865

Veghe 931, 937, 938, 939

Velocitate 269, 270, 271

Vene 314, 365

– pulmonare 389

Venoconstricție 373

Venodilatație 373

Ventilație de repaus 395–396

– forțată 396

– pulmonară 387, 394, 406–407

Ventricul (drept, stâng) 276

Venule 318

Vermix caseosa 759

Vezica urinară 614, 615, 616

Veziculă biliară 509, 511

Vezicule seminale 671

– sinaptice 128

Vigilență 942–943

Vilozități intestinale 515

Vise 941–942

Vitamina A 458

– B (B₁, B₂, B₆, B₁₂) 205, 458, 459, 460, 608, 747

– C 205, 458, 460, 608, 747

– D (D₁, D₂) 458, 481, 607, 691, 692, 746,

– E 458, 459, 747

– H 458, 460, 747

– K 231, 232, 458, 459, 747

– PP 205, 458, 460

Viteză de conducere 126

– – scurgere 319, 320

– – sedimentare a hematiilor (VSI) 196

Volum hâtaie 271, 273, 283, 322

– de aer curent (VC) 409

– eritrocitar mediu (VEM) 195

– expirator de rezervă (VER) 409

– – maxim pe secundă (VEMS) 410

Volom globular 180–181

– iospirator de rezervă (VIR) 409

– plasmatic 180–181

– rezidual (VR) 409

– sanguin 181, 183, 319, 322

– – pulmonar 391–392

– sistolic 288, 328

– telediastolic 277

– telesistolic 277

Vomă 499

Vorbire 974–975

Z

Zaharază 531

Zaharoză 518, 531

Zgomot laringo-traheal 450

Zgomotele inimii 278–281

Zimogen 505

Zinc 50, 461

Zonă reflexogenă endocardo-aortică 331–333, 344, 373, 439, 440

– – sino-carotidiană 331–333, 344, 373, 382, 439, 440

– „trigger” 499

